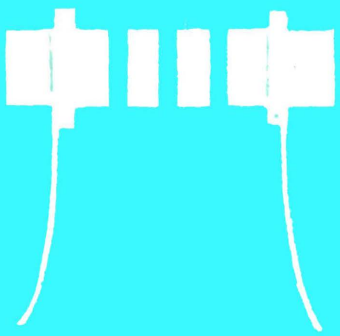
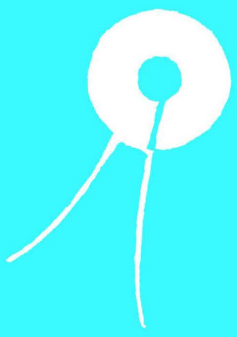
Préparation au Brevet de Radio-électricien
et au Brevet de Technicien électronicien
classe de 1re

BET

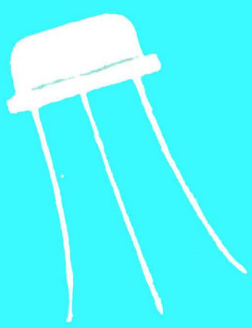
J. MORNAND

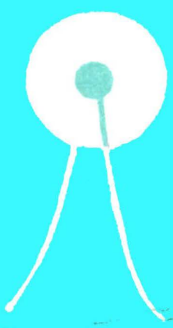




technologie d'électronique

matériel des télécommunications





DUNOD

BIBLIOTHÈQUE DE L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

TECHNOLOGIE D'ÉLECTRONIQUE

Matériel des télécommunications

PAR

J. MORNAND

Ingénieur des Arts et Métiers
Professeur au Lycée Chevrollier, Angers

Ouvrage inscrit sur la liste des manuels adoptés par la ville de Paris

NOUVEAU TIRAGE

Classe de 1re

Préparation au brevet de radio-électricien et au brevet de technicien électronicien

DUNOD
PARIS
1965

©, 1963 DUNOD

Extraits du programme de technologie professionnelle générale de la classe de 1re des Lycées techniques (section Radioélectricité)

Arrêté du 29 juin 1955

I. Les tubes électroniques.

1° Tubes de réception.
2° Tubes d'émission.
3° Tubes spéciaux : à gaz, cathodiques, photo-électriques.
4° Diodes et triodes au germanium et au silicium.

II. Les bobinages B.F.

1° Les fils et matériaux magnétiques.
2° Les bobinages pour fréquences industrielles.
3° Les bobinages pour fréquences acoustiques.
4° Les blindages électrostatiques.
5° Imprégnation et protection.

III. Les bobinages H.F.

1° Les fils et matériaux magnétiques.
2° Différents modèles de bobinages.
3° Les bobinages d'émission.
4° Les bobinages de réception.
5° Les blindages électromagnétiques.
6° Imprégnation et protection.

IV. Les reproducteurs acoustiques.

1° Écouteurs.
2° Haut-parleurs.
3° Microphones.
4° Lecteurs phonographiques.

V. Redresseurs a contact.

1° A l'oxyde de cuivre.
2° Au sélénium.

VI. Antennes.

1° Antennes de réception et d'émission.
2° Antennes de véhicules.
3° Lignes de transmission H.F.
4° Prises de terre et contrepoids.
5° Cadres.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER : **Tubes électroniques**

I. *Tubes à vide* (matériel de réception grand public) 1

A Diode. 1
B Triode 7
C Tétrode 11
D Pentode 15
E Tubes à plus de trois grilles 18
F Tubes multiples. 20

II. *Tubes à vide professionnels* 21

A Généralités 21
B Différents types. 21

III. *Tubes d'émission* 24

A Généralités 24
B Tubes pour faibles puissances. 24
C Tubes pour puissances moyennes. 24
D Tubes pour grandes puissances 29
E Code des tubes d'émission. 31
F Utilisations 34

IV. *Tubes cathodiques* 34

A Généralités 34
B Oscilloscopes cathodiques 37
C Cinescopes 44
D Indicateurs cathodiques 53
E Tubes compteurs décimaux 56

V. *Tubes hyperfréquences* 57

A Généralités 57
B Triodes pour très hautes fréquences 57
C Tubes spéciaux pour hyperfréquences 60

VI. *Tubes à gaz*. 69

A Généralités 69
B Tubes à cathode chaude 74
C Tubes à cathode froide. 81
D Tubes à cathode liquide 86

VII. *Tubes et dispositifs photo-électriques* 91

A Généralités 91
B Effet photo-émissif 93
C Effet photoconductif 107
D Effet photovoltaïque 111
E Code 115

VIII. *Tubes divers*. 118

A Tubes à rayons X 118
B Tubes régulateurs d'intensité 121
C Thermocouples 121
D Autres tubes 122

CHAPITRE 2 : **Dispositifs à semi-conducteurs**

I. *Généralités* 123

A Définitions 123
B Représentation schématique 125

II. *Redresseurs secs*. 125

A Principe 125
B Matériaux 126
C Fabrication 126
D Protection 127
E Limites d'emploi 127
F Différents modèles 129
G Caractéristiques. 131
H Marquage 133
I Essais 133
J. Applications. 134

III. *Diodes à cristaux* 135

A Principe 135
B Fabrication 136
C Caractéristiques. 138
D Différents modèles 140
E Applications. 141

IV. *Dispositifs spéciaux à jonction* 143

A Photodiodes. 143
B Diodes régulatrices de tension 143
C Diodes à capacité variable 144
D Diodes tunnel 145
E Semi-conducteurs à effet Peltier 145

V. *Transistors* 145
A Principe 145
B Fabrication 149
C Différents modèles 151
D Caractéristiques. 151
E Applications. 153
VI. *Code* 153
VII. *Normes* 154

CHAPITRE 3 : **Bobinages B.F.**

I. *Généralités* 155
A Définitions 155
B Représentation schématique 157
C Identification 157
D Matériaux 157
E Machines à bobiner. 161
II. *Transformateurs d'alimentation* 162
A Calcul simplifié d'un transformateur. 162
B Caractéristiques. 165
C Construction. 166
D Classification 169
III. *Transformateurs pour fréquences acoustiques*. 171
A Calcul simplifié d'un transformateur. 171
B Caractéristiques. 174
C Construction 174
D Classification 177
IV. *Inductances B.F.* 182
A Calcul d'une inductance de filtrage 182
B Caractéristiques. 183
C Construction 183
V. *Essais* 184
A Liste des essais 184
B Exécution des essais 185
VI. *Normes* 185

CHAPITRE 4 : **Bobinages H.F.**

I. *Généralités* 186
A Formules générales 186
B Pertes dans les bobinages 187

II. *Matériaux* 188
A Conducteurs. 188
B Isolants 189
C Matériaux magnétiques 190
D Blindage magnétique 197

III. *Modes de bobinages*. 198
A Différents types. 198
B Machines à bobiner. 199
C Calcul des bobinages 200

IV. *Applications*. 202
A Bobinages de réception H.F. 202
B Bobinages de réception M.F. 208
C Bobines d'arrêt H.F. 213
D Bobinages pour télévision 213
E Bobinages pour émission 215

V. *Normes* 216

CHAPITRE 5 : **Les microphones**

I. *Généralités* 217
A Définitions 217
B Représentation schématique 219
C Rappel de notions d'acoustique 220
D Caractéristiques. 223
E Classification des microphones 226

II. *Microphones à charbon*. 229
A Principe 229
B Différents modèles 230
C Limites d'emploi 231

III. *Microphones piezoélectriques* 232
A Principe 232
B Différents modèles 236
C Limites d'emploi 238

IV. *Microphones électrostatiques* 239
A Principe 239
B Différents modèles 240
C Limites d'emploi 241

V. *Microphones électrodynamiques* 242
A Principe 242
B Différents modèles 243
C Limites d'emploi 246

VI. *Installation des microphones* 247
A Fixation 247
B Disposition 248

CHAPITRE 6 : **Les haut-parleurs**

I. *Généralités* 251
A Définitions 251
B Représentation schématique 251
C Caractéristiques. 252
D Classification 253

II. *Haut-parleur électromagnétique* 255
A Principe 255
B Limites d'emploi 255

III. *Haut-parleur électrodynamique* 255
A Principe 255
B Limites d'emploi 257

IV. *Haut-parleur piézoélectrique* 257
A Principe 257
B Limites d'emploi 257

V. *Haut-parleur électrostatique* 258
A Principe 258
B Limites d'emploi 258

VI. *Elément constitutifs*. 259
A Circuit magnétique. 259
B Bobine mobile 261
C Membrane ou cône 263
D Spider 267
E Bâti 269

VII *Dispositifs acoustiques* 269
A Ecran ou baffle 269
B Pavillon 272
C Association de haut-parleurs 276

VIII. *Données numériques* 277

IX. *Ecouteurs* 280
A Ecouteur électro-magnétique 280
B Autres types. 281
C Utilisations 282

CHAPITRE 7 : **Les supports du son**

I. *Définitions générales* 283

II. *Enregistrement sur disques* 284

A Description des disques 284
B Fabrication 287
C Défauts des disques 290

III. *Enregistrement magnétique* 290

A Description des supports magnétiques 290
B Fabrication des bandes 291
C Enregistrement 293

IV. *Enregistrement optique* 293

A Description des supports optiques 293
B Enregistrement 294

CHAPITRE 8 : **Les appareils de lecture**

I. *Lecteurs phonographiques* 296

A Généralités 296
B Têtes de lecture électromagnétiques 298
C Têtes de lecture électrodynamiques 300
D Têtes de lecture piézoélectriques 301
E Pointes de lecture 304
F Bras de lecture 304
G Tourne-disques 306

II. *Lecteurs magnétiques* 310

A Généralités 310
B Têtes magnétiques 311
C Magnétophone 312

III. *Lecteurs optiques* 313

CHAPITRE 9 : **Les antennes**

I. *Généralités* 314

A Définitions 314
B Symbolisation 314
C Rappel sur les ondes électromagnétiques 315
D Caractéristiques des antennes 319
E Alimentation des antennes 324
F Adaptation des antennes 325
G Classification des antennes 327

II. *Antennes de réception* 328
A Antennes pour radio-récepteurs fixes 328
B Antennes pour installations mobiles 332
C Antennes pour télévision et F.M. 334
D Antennes pour radars 346
E Cadres 347

III. *Antennes d'émission* 349
A Antennes pour ondes hectométriques 349
B Antennes pour ondes kilométriques 350
C Antennes pour ondes décamétriques 351
D Antennes pour ondes métriques 352

IV. *Lignes ou feeders* 353
A Caractéristiques des lignes 353
B Réalisation 355

Bibliographie 357

Index 359

ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

		Fréquences	Longueurs d'ondes
RAYONS COSMIQUES			
		3.10^{11} THz	0,011 μμ
RAYONS γ			
		3.10^{7} THz	10 μμ
RAYONS X			
		3.10^{4} THz	10 mμ
RAYONS ULTRA-VIOLET			
		750 THz	0,4 μ
LUMIÈRE VISIBLE			
		300 THz	0,8 μ
RAYONS INFRA-ROUGE			
		3 THz	100 μ
ONDES HERTZIENNES		300 GHz	1 mm
	millimétriques	30 GHz	1 cm
	centimétriques	3 GHz	1 dm
	décimétriques	300 MHz	1 m
	métriques	30 MHz	1 dam
	décamétriques	3 MHz	1 hm
	hectométriques	300 kHz	1 km
	kilométriques	30 kHz	10 km
	myriamétriques		

Nota. — Les limites entre rayons cosmiques, γ, X et ultra-violet ainsi qu'entre infra-rouge et ondes hertziennes ne sont qu'approximatives car les plages correspondantes se recouvrent assez largement.

CHAPITRE PREMIER

TUBES ÉLECTRONIQUES

I. TUBES A VIDE (Matériel de réception grand public).

A - Diode.

1° Définitions [1].

Un *tube à vide* est un tube électronique dans lequel le vide a été suffisamment poussé pour que ses propriétés électriques ne soient pas essentiellement modifiées par l'ionisation du gaz ou de la vapeur résiduels.

Une *diode* est un tube électronique comportant deux électrodes : une cathode émettant des électrons et une anode (ou plaque) les recueillant.

Un *kénotron* est un terme industriel désignant les diodes à vide à cathode chaude.

2° Principe de fonctionnement.

a) Emission thermo-électronique.

Lorsque la cathode est chauffée, soit par la circulation d'un courant électrique dans le fil (chauffage direct) soit par l'utilisation d'un élément chauffant indépendant (chauffage indirect) un certain nombre d'électrons libérés de leurs liaisons atomiques acquièrent une énergie suffisante qui leur permet de quitter la cathode.

Ce phénomène résultant uniquement de l'agitation thermique s'appelle émission thermoélectronique ou *effet Edison*.

L'émission augmente quand la température augmente.

b) Charge d'espace.

Les ions positifs créés au sein de la cathode tendent à rappeler les électrons qui viennent de s'échapper. D'autre part les électrons expulsés forment

[1] La plupart des définitions données à chaque paragraphe sont tirées de la norme NF C 01-007. Vocabulaire électrotechnique (groupe électronique).

autour de la cathode une barrière qui s'oppose à la sortie des électrons suivants. Ce nuage d'électrons crée une charge électrique négative appelée charge d'espace (fig. 1-1).

c) Rôle de la tension anodique.

En l'absence de tension positive sur l'anode il y a très peu d'électrons qui y parviennent et le courant traversant le circuit est très faible.

Lorsqu'on applique une tension positive sur l'anode le courant devient important. L'anode attire les électrons de la charge d'espace qui se reconstitue par émission thermoélectronique (fig. 1-2).

Rappelons que l'on a choisi comme sens de courant le sens opposé à celui du déplacement des électrons.

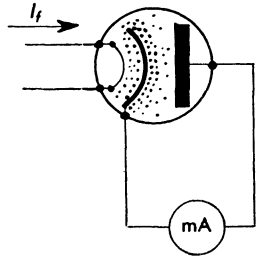
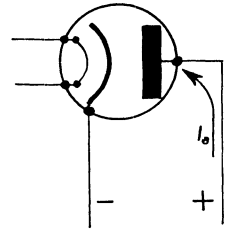


Fig. 1-1



et Fig. 1-2.
Diode : principe de fonctionnement.

3° Caractéristique statique.

La caractéristique statique est la courbe qui exprime la relation entre le courant d'anode I_a et la tension d'anode V_a pour une impédance de charge nulle, en régime continu. Les courbes obtenues pour différentes températures de la cathode T_1, T_2, T_3 sont celles de la figure 1-3.

a) Loi de Child-Langmuir.

Le courant obtenu est indépendant de la température de la cathode entre les points A et B. Il ne dépend que de V_a.

La relation qui lie I_a et V_a s'écrit

$$\boxed{I_a = G\ V_a^{3/2}} \quad : \text{ Loi de Child-Langmuir.}$$

G s'appelle la *pervéance* et ne dépend que de la géométrie de la diode : distance, forme et dimensions des électrodes; elle est indépendante des propriétés émissives de la cathode.

La loi de Child-Langmuir caractérise le régime de charge d'espace.

b) Loi de Richardson-Dushmann.

La caractéristique I_a (V_a) montre que le courant n'augmente plus lorsque la tension anodique dépasse une certaine valeur. La diode fonctionne en

régime de *saturation*. Pour une certaine température de la cathode, l'anode capte tous les électrons émis à partir d'une certaine tension d'anode. Le courant n'augmente presque plus quand V_a continue de croître.

Courant de saturation I_s : valeur du courant en régime de saturation ou pouvoir émissif.

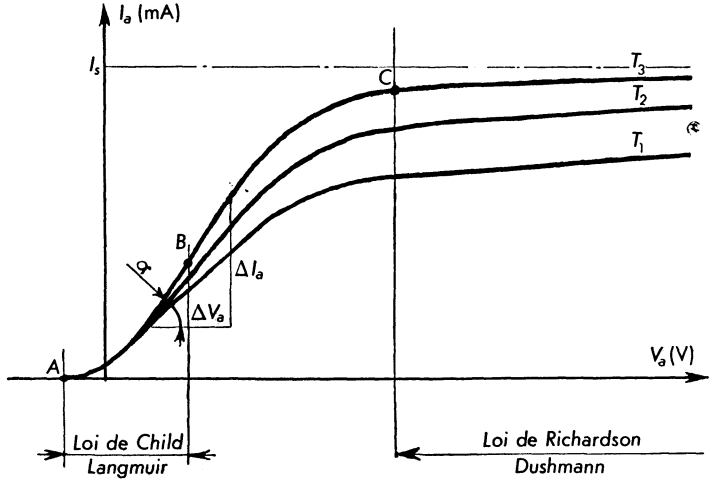


Fig. 1-3. — Caractéristiques de la diode.

Pouvoir émissif spécifique J_s : C'est le nombre d'électrons émis par unité d'aire et par unité de temps. Il est représenté par la densité de courant d'émission.

$$J_s = \frac{I_s}{S} \cdot$$

Les courbes de la figure 1-3 nous montrent que le courant de saturation dépend de la température de la cathode.

La relation qui lie la densité du courant d'émission à la température est donnée par la loi de Richardson-Dushmann et s'écrit :

$$\boxed{J_s = A\ T^2\ e^{-b/T}}$$

J_s : densité du courant d'émission,
T : température absolue de la cathode en °K,
e : base des logarithmes népériens e = 2,718...,
A : constante dépendant de la nature de la cathode. Sa valeur est constante pour les métaux purs,
b : constante caractéristique de la nature de la cathode ou température absolue équivalente au travail d'extraction.

$$b = \frac{W_s}{B}$$

W_s : travail d'extraction
B : constante de Boltzmann.

TABLEAU 1-1. — MATÉRIAUX POUR CATHODES

	Tungstène	Tungstène thorié	Oxydes
A	60	3 à 15	10^{-3} à 1
b	52 400	30 500	11 600
T (°K)	2 500	1 800	1 000
J_s (A/cm²)	1	2	0,5

c) Effet Schottky.

Le courant de saturation ne peut pas être obtenu sur les tubes ordinaires car la cathode à oxydes serait détruite. Il se produit des points chauds avec fusion progressive et des lueurs bleuâtres dues à l'ionisation apparaissent car le vide n'est pas parfait.

Avec les tubes à cathode de tungstène, on a admis en première approximation que le courant de saturation ne croissait plus quand la tension positive de l'anode augmentait. En fait, pour des tensions élevées, il peut en résulter une augmentation importante du courant I_s que l'on appelle effet Schottky. Il est dû à l'action du champ électrique important au voisinage de la cathode qui facilite la sortie des électrons.

Cet effet est utilisé dans certains tubes électroniques fonctionnant en impulsions (magnétrons de radar).

d) Résistance interne.

La résistance interne en un point de la caractéristique est égale au rapport de l'accroissement de la tension par l'accroissement correspondant du courant.

$$\rho = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a}$$

ΔV_a en volts
ΔI_a en ampères
ρ en ohms.

Elle varie avec le point de fonctionnement. Elle est représentée par l'inverse de la pente de la caractéristique au point considéré (fig. 1-3) :

$$\rho = 1/\text{tg } \alpha.$$

4° Applications.

Les diodes se comportent comme des conducteurs unidirectionnels puisqu'elles ne laissent passer le courant que lorsque l'anode est positive. Cette propriété est utilisée dans deux applications importantes. Le redressement du courant alternatif industriel (valves d'alimentation) et la détection des courants de haute fréquence.

5° Différents types.

a) Valves d'alimentation.

En réception elles doivent fournir un débit de 100 à 300 mA sous une tension de 300 à 400 V. Le rendement de 20 à 40 % est d'autant plus faible que la valve est plus miniaturisée.

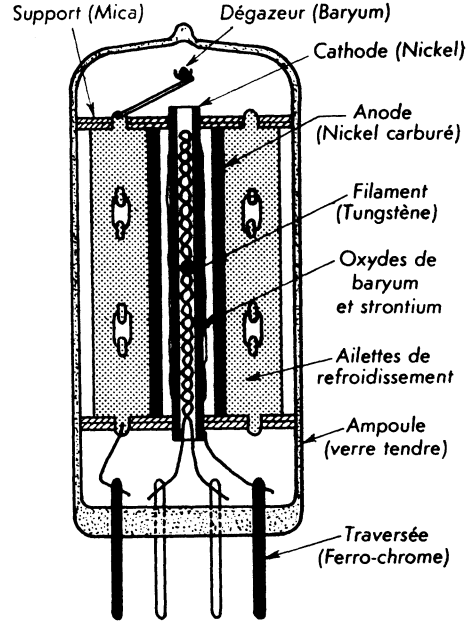


Fig. 1-4. — Valve d'alimentation.

La nature et la forme des électrodes ont été examinées dans le tome I. La figure 1-4 montre un exemple de valve d'alimentation. La figure 1-5 montre la disposition adoptée généralement pour les deux anodes d'une valve biplaque et la figure 1-6 une anode de valve pour récepteur tous courants. Les deux parties sont le plus souvent agrafées ensemble.

b) Diodes de détection.

Elles redressent des courants de l'ordre du milliampère sous des tensions de l'ordre du volt.

La fréquence de coupure qui peut atteindre plusieurs centaines de mégaherz est conditionnée par :

— La capacitance de l'intervalle cathode-anode qui doit être assez grande devant la résistance interne.

— Le temps de transit des électrons qui doit être faible devant la demi-période du courant de haute fréquence.

Pour des fréquences plus élevées, on emploie des diodes à cristal dont la fréquence de coupure atteint plusieurs milliers de mégaherz.

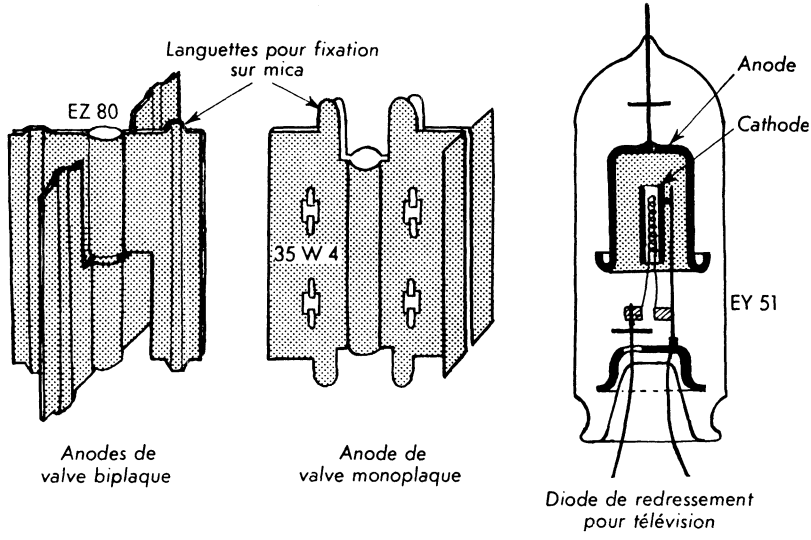


Fig. 1-5 à Fig. 1-7. — Diodes de redressement.

Les figures 1-8 à 1-10 montrent quelques exemples constructifs de diodes de détection.

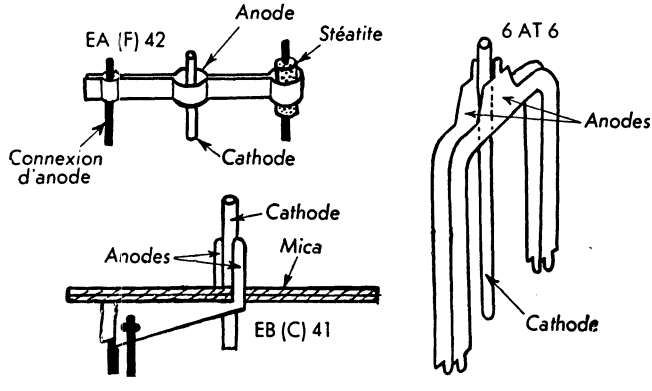


Fig. 1-8 à Fig. 1-10. — Diodes de détection.

c) Diodes de redressement.

La figure 1-7 montre une diode de redressement pour T.H.T. utilisée en télévision. Les différences constructives avec les modèles précédents sont dues à la très haute tension d'anode (10 à 20 kV) et au courant très faible. Les formes adoptées évitent la création d'arcs ou d'effluves.

Certaines diodes à haute tension et enveloppe céramique sont prévues pour fonctionner en impulsions à température élevée.

L'anode est soit cylindrique, soit plane et comporte des ailettes permettant la fixation et assurant la rigidité.

B - Triode.

1° Définition.

Une triode est un tube électronique à trois électrodes : une cathode, une anode et une électrode de commande (grille).

La triode a été inventée en 1907 par l'Américain Lee de Forest.

2° Principe de fonctionnement.

a) Grille négative.

Portons la grille à un potentiel négatif par rapport à la masse (fig. 1-11). On constate que pour un même potentiel d'anode V_a, le courant I_a est inférieur à celui que l'on obtient avec un potentiel de grille nul.

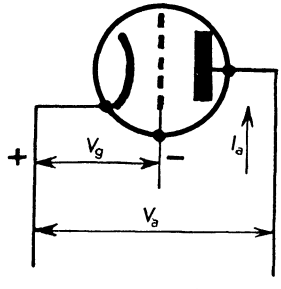


Fig. 1-11

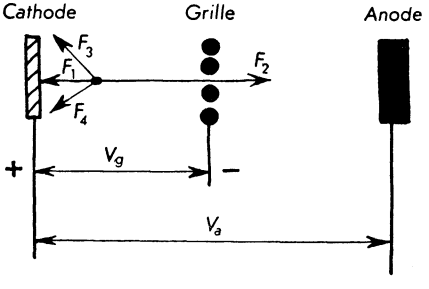


Fig. 1-12.
Fonctionnement de la triode.

Examinons les actions auxquelles est soumis l'électron lorsqu'il a été expulsé de la cathode par effet thermoélectronique. Nous voyons sur la figure 1-12, que quatre forces principales le sollicitent.

F_1 : force de répulsion due à la présence de la charge d'espace.

F_3 et F_4 : Forces de répulsion dues aux éléments de grille les plus proches.

F_2 : Force d'attraction de l'anode.

L'électron ne peut poursuivre son chemin vers l'anode que si la résultante des actions précédentes est dirigée vers l'anode. Lorsqu'on fait varier la tension de la grille, les forces F_3 et F_4 sont modifiées ainsi que le trajet correspondant des électrons. Les trajectoires sont matérialisées sur les figures 1-13. Nous voyons que la grille peut contrôler le flux électronique. Lorsque sa tension négative est suffisante aucun électron ne peut passer et le tube est bloqué. A mesure que la tension négative diminue le flux électronique augmente. Pour $V_g = 0$ on constate que son influence est négligeable.

b) Grille positive.

Lorsque la grille est portée à un potentiel positif, elle constitue avec la cathode une diode. Elle accélère les électrons et le courant I_a continue à augmenter mais les électrons qui passent à proximité sont captés et on observe un courant de grille qui croît très vite avec la tension de grille.

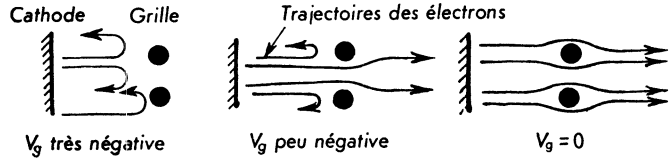


Fig. 1-13. — Influence de la grille.

Lorsque le potentiel de grille dépasse une certaine valeur, le courant I_a diminue car la grille prélève une fraction importante de l'émission cathodique.

Le courant de grille qui est utilisé dans un certain nombre d'applications par suite du rendement plus élevé peut cependant provoquer de la distorsion d'amplitude.

Il ne doit pas dépasser certaines valeurs qui provoqueraient une émission thermoélectronique de grille et un échauffement exagéré avec déformation, mettant le tube hors caractéristiques. Certains traitements tels que la dorure ou le polissage électrolytique permettent de diminuer cette émission thermoélectronique.

3° Caractéristiques statiques.

a) Caractéristiques I_a (V_a) : (fig. 1-14).

Lorsque $V_g = 0$ on obtient une caractéristique analogue à celle d'une diode. En appliquant des tensions négatives à la grille les nouvelles caractéristiques obtenues se déduisent sensiblement par translation de la précédente. L'ensemble des courbes obtenues s'appelle réseau de Kellog.

La saturation ne peut être obtenue qu'avec des cathodes de tungstène.

De plus le point de repos de la triode doit être choisi au dessous de l'hyperbole de dissipation maximale. Elle est construite à partir de $P_a = V_a I_a$, puissance maximale que peut dissiper l'anode en régime permanent.

b) Caractéristiques I_a (V_g) : (fig. 1-15).

Lorsque la tension de grille est suffisamment négative le tube est bloqué et le courant I_a est nul. En augmentant progressivement la tension sur la grille on constate d'abord que la courbe est assez incurvée. Le courant I_a augmente assez lentement car la répulsion de la charge d'espace est prépondérante. Ensuite la pente de la caractéristique augmente et se maintient à une valeur sensiblement constante jusqu'à $V_g = 0$. Lorsque V_g prend des valeurs positives le tube fonctionne avec un courant de grille important.

Au-dessus d'une certaine valeur, I_a diminue car une partie importante des électrons est captée par la grille au détriment de l'anode.

Pour des tensions d'anode différentes on obtient de nouvelles courbes qui se déduisent sensiblement de la précédente caractéristique par translation.

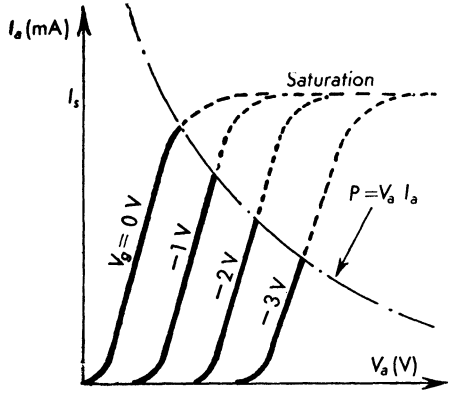


Fig. 1-14

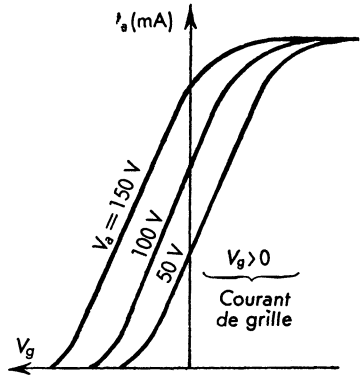


Fig. 1-15.

Caractéristiques de la triode.

Ces courbes nous montrent que pour des variations peu importantes de la tension grille on obtient de grandes variations de l'intensité anodique.

4° Paramètres de la triode.

a) Valeurs usuelles.

Les paramètres dont les définitions ont été vues dans le tome I varient entre les limites suivantes :

Résistance interne : $6\,000\ \Omega < \rho < 60\,000\ \Omega$.
Pente (ou transconductance) : $1{,}2$ mA/V $< S < 12$ mA/V.
Coefficient d'amplification : $K < 100$.

b) Influence de la géométrie du tube.

La résistance interne augmente :

— avec la distance anode-cathode;
— avec le diamètre du fil de grille;
— lorsque le pas de la grille diminue;
— lorsque la surface émissive de cathode diminue.

La pente augmente :

— lorsqu'on diminue la distance grille cathode;
— lorsqu'on diminue le pas de la grille;
— avec la diamètre du fil de grille;
— avec la surface émissive de la cathode.

Le facteur d'amplification augmente :
— avec la distance anode grille;
— avec le diamètre du fil de grille;
— si on diminue le pas de la grille.

Une structure rectangulaire se rapprochant de la forme plane idéale permet d'améliorer les performances de la triode, mais la fabrication est plus délicate et la rigidité plus difficile à obtenir.

5° Inconvénients de la triode.

a) Performances.

Nous avons vu que les triodes peuvent avoir des pentes élevées mais que leur résistance interne et leur coefficient d'amplification sont faibles.

Bien que l'amplification en tension et le rendement des triodes soient faibles, elles ont l'avantage de provoquer peu de distorsions et de peu amortir les circuits.

b) Capacités inter-électrodes.

Les électrodes, étant en regard, forment entre elles des condensateurs dont les capacités comprises entre un et quelques dizaines de picofarads, augmentent avec les dimensions du tube et le rapprochement des électrodes.

Les capacités grille-cathode (C_{gk}) et anode-cathode (C_{ak}) provoquent un affaiblissement des tensions alternatives. Cet affaiblissement augmente avec la fréquence.

La capacité anode-grille (C_{ag}) reporte sur la grille une partie des variations de la tension amplifiée. Il y a réaction et l'amplificateur peut produire des oscillations parasites qu'il faut généralement éviter. Tout se passe comme si l'espace cathode grille était shunté par une capacité $C' = C_{ag}\ (1 + A)$. Si par exemple $C_{ag} = 10$ pF on obtient avec une amplification $A = 20$ une capacité C' dépassant 200 pF non négligeable en HF.

6° Différents modèles.

La triode se prête bien à la plupart des fonctions demandées aux tubes électroniques : Amplification de tension, oscillations, déphasage, détection, commande de relais, etc.

L'étude de la géométrie du tube et l'amélioration des procédés de fabrication ont permis la réalisation d'une gamme assez étendue de doubles triodes utilisées dans les montages H.F. en télévision et en modulation de fréquence (pente 6 à 12 mA/V), dans les montages de multivibrateurs et de déphasage sur appareils de mesures.

Les figures 1-16 à 1-19 montrent quelques modèles de triodes. Lorsque l'intensité anodique est importante la cathode est noircie (fer aluminisé noir ou nickel carburé gris). Les doubles triodes sont séparées par un blindage électrostatique. Nous avons vu que l'obtention de fortes pentes est obtenue par rapprochement de la distance cathode-grille et l'augmentation de la surface émissive. Ces principes apparaissent bien sur la vue du tube PCC 189 dont la pente obtenue est de 12,5 mA/V (cathode rectangulaire, grille cadre,

fil de grille de 10 μ de diamètre et distance grille-cathode de 57 μ) (1). La forme d'anode permet un rapprochement sans augmentation de la capacité.

L'effet microphonique est diminué par utilisation d'un mica frein (tome I) ou par centrage de la cathode par un mica de faible épaisseur maintenu entre deux micas plus épais.

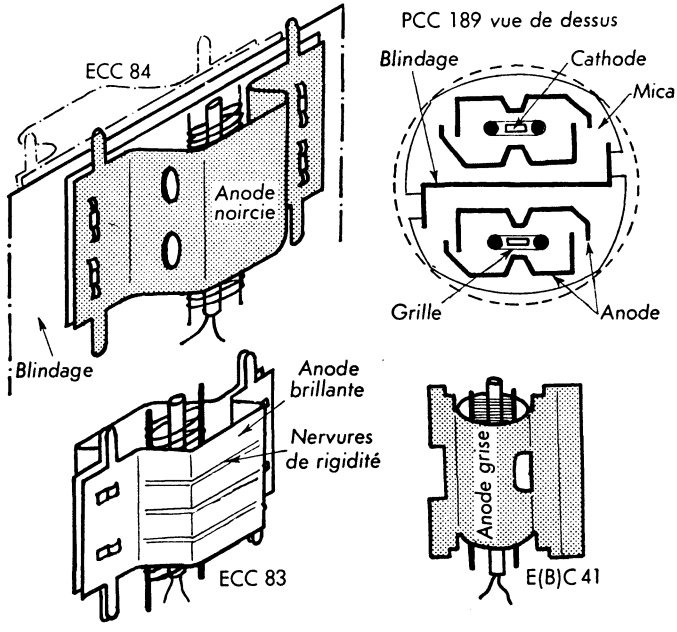


Fig. 1-16 à Fig. 1-19. — Modèles de triodes.

C - Tétrode.

1° Définitions.

La tétrode est un tube électronique à quatre électrodes : une cathode, une anode, une électrode de commande et une électrode supplémentaire constituée généralement par une grille.

Lorsqu'un tube contient plusieurs grilles on peut les désigner par leur numéro d'ordre à partir de la cathode, par exemple :

— grille n° 2 (ou g_2) : grille occupant le rang 2 à partir de la cathode.

2° Principe (fig. 1-20).

La grille placée entre la grille de commande et l'anode s'appelle grille-écran. Elle est portée à un potentiel positif fixe ($\leqslant V_a$) dont le rôle est de

(1) Le fil doit être le plus fin possible afin d'éviter l'effet d'îlot.

réduire l'effet électrostatique de l'anode dans l'espace situé entre la grille écran et la cathode. Les avantages sont les suivants :

a) La capacité anode-grille de commande est nettement diminuée. C_{ag} mille fois plus faible que pour la triode.

b) La grille écran est aussi une grille accélératrice dont l'action précède celle de la plaque. Lorsque les électrons arrivent vers la grille écran l'action de l'anode devient prépondérante.

Il en résulte que pour une même amplification on peut utiliser une tension d'anode plus faible.

La grille écran capte néanmoins un certain nombre d'électrons et il se produit un courant d'écran qui est de l'ordre du cinquième de I_a dans l'emploi normal des tétrodes.

c) L'interposition de la grille écran éloigne l'anode de la cathode et il en résulte d'après ce que nous avons vu sur la géométrie de la triode que la résistance interne et le facteur d'amplification sont augmentés. La pente reste égale à celle d'une triode.

$$\begin{aligned} 20\ \text{k}\Omega &< \rho < 100\ \text{k}\Omega \\ 100 &< K < 1\,000 \\ 1\ \text{mA/V} &< S < 10\ \text{mA/V}. \end{aligned}$$

d) Les caractéristiques dynamiques I_a (V_g) sont peu différentes des caractéristiques statiques.

Rappelons que la caractéristique dynamique est une caractéristique en régime alternatif à impédance de charge non nulle.

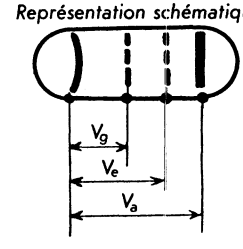


Fig. 1-20

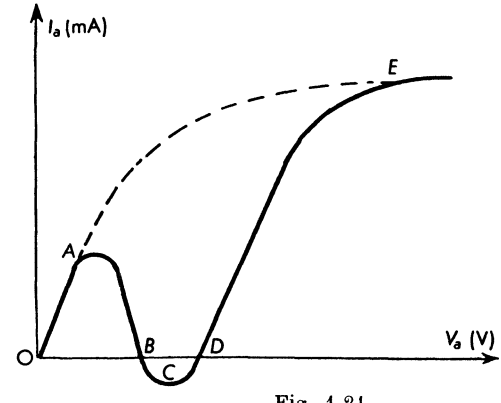


Fig. 1-21.
Tétrode : effet dynatron.

3° Caractéristiques.

Les caractéristiques I_a (V_g) sont semblables à celles étudiées pour la triode.

Les caractéristiques I_a (V_a) présentent un crochet qui s'explique par l'émission d'électrons secondaires par l'anode et capturés par la grille écran (effet dynatron) (fig. 1-21).

4° Effet dynatron.

Lorsque des électrons frappant l'anode possèdent des énergies suffisantes il se produit une émission secondaire d'électrons.

Ces électrons secondaires sont constitués par des électrons primaires réfléchés, réémis après un certain parcours dans le métal de l'anode ou par des électrons arrachés à l'anode.

Interprétation de la caractéristique I_a (V_a) :

— De A à B le courant Ia diminue progressivement car l'émission secondaire croît. Les électrons secondaires se dirigent en sens inverse des électrons primaires et sont captés par la grille-écran.

— De B à C le flux d'électrons secondaires est plus important que le flux d'électrons primaires et le courant I_a prend des valeurs négatives.

— A partir de C le phénomène s'inverse. Le nombre d'électrons secondaires diminue car la tension de plaque est suffisante pour rappeler ceux dont l'énergie est la plus faible.

— En E, il n'y a presque plus d'électrons secondaires et la courbe se confond pratiquement avec la courbe en pointillés qui représente le courant I_a qui existerait si l'effet dynatron était supprimé.

L'effet dynatron présente de sérieux inconvénients pour l'utilisation normale de la tétrode par suite de la distorsion d'amplitude qui en résulte et on n'utilise plus de tétrodes ordinaires.

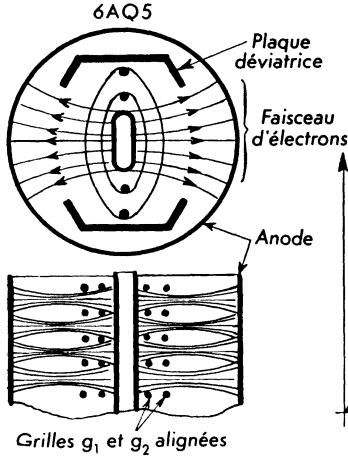


Fig. 1-22

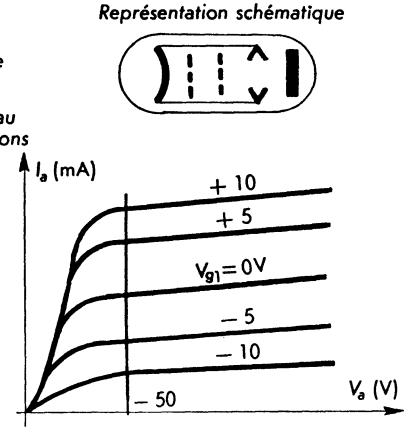


Fig. 1-23.

Tétrode à faisceaux dirigés.

5° Différents modèles.

a) Tétrode à faisceaux électroniques (ou à faisceaux dirigés).

Description (fig. 1-22).

Elles possèdent deux plaques déviatrices reliées à la cathode. Elles ont pour but de concentrer les électrons primaires en un faisceau étroit par suite

de la répulsion qu'elles provoquent. La concentration importante des électrons primaires animés de vitesses sensiblement identiques permet de repousser les électrons secondaires.

L'effet dynatron est supprimé.

Les propriétés sont améliorées du fait de la distance anode-écran plus grande que dans les tétrodes ordinaires (1) et de l'alignement des grilles g_1 et g_2 permettant une meilleure forme du faisceau et la diminution du courant d'écran.

Caractéristiques I_a (V_a) : (fig. 1-23).

Elles ne possèdent plus de crochet. Elles présentent un palier à partir d'une tension d'anode de 50 V environ. La puissance de sortie est importante pour une tension d'anode faible.

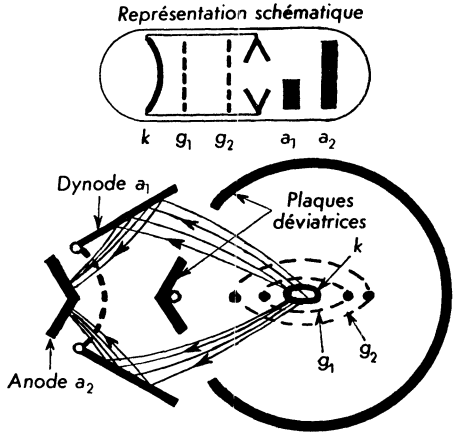


Fig. 1-24 et **Fig.** 1-25.
Tétrode à émission secondaire.

Applications :

Elles sont utilisées comme tétrodes de puissance avec les avantages suivants :

— Faible distorsion (le taux d'harmoniques de rang impair est plus faible qu'avec les pentodes).
— Rendement élevé.
— Puissance de sortie importante.
— Faible courant de grille-écran ($I_{g2} < I_a/10$).

b) Tétrode à émission secondaire : (fig. 1-24 et 1-25).

Le tube comporte une cathode à chauffage indirect (k), une grille-écran (g_2) alignée avec la grille de commande g_1 et des plaques déviatrices réunies à la cathode.

Le flux d'électrons est concentré en deux faisceaux qui viennent frapper l'électrode appelée *dynode* dont une partie est ajourée, laissant ainsi passer les électrons secondaires qui sont captés par l'anode.

Un électron primaire libère environ cinq électrons secondaires (2) permettant ainsi d'obtenir une forte pente de l'ordre de 14 à 17 mA/V (3).

En plaçant une résistance de charge dans le circuit d'anode et une autre dans le circuit de la dynode on obtient un montage déphaseur car les tensions anode et dynode sont déphasées de 180°.

(1) On peut arriver expérimentalement à supprimer l'effet dynatron en éloignant suffisamment l'anode de la grille écran. La distance minimale obtenue s'appelle distance critique (3 cm).

(2) Cette propriété est utilisée dans les tubes multiplicateurs étudiés plus loin.

(3) L'émission secondaire permet, d'obtenir des tubes amplificateurs à performances élevées présentant un rapport « pente-courant » élevé.

Tubes utilisés : EEP1, 4696, EE1. Le fonctionnement des tubes est très critique et il ne faut pas s'écarter des conditions de fonctionnement indiquées par le constructeur, sous peine d'instabilité (1).

D - Pentode.

1° Définitions.

Une *pentode* est un tube électronique à cinq électrodes : une cathode, une anode, une grille de commande et deux électrodes supplémentaires constituées généralement par des grilles.

On appelle *grille d'arrêt* une grille placée entre deux électrodes positives (généralement grille écran et anode et dont le rôle est principalement de réduire l'effet de l'émission secondaire.

2° Principe (fig. 1-26).

La grille d'arrêt g_3 appelée encore grille frein ou suppresseuse est reliée à la cathode intérieurement ou extérieurement. Elle est à pas très lâche. Son potentiel négatif par rapport à l'anode lui permet de repousser les électrons secondaires. Les avantages obtenus comparables à ceux de la tétrode à faisceaux électroniques sont les suivants :

a) L'effet dynatron est supprimé. Le courant anodique croît sans inversion de pente quand la tension anodique augmente.

b) La tension anodique n'a plus, dans la pentode, qu'une faible influence sur le courant anodique, du fait de l'éloignement de l'anode et de la cathode, (voir caractéristiques).

c) La présence de la grille d'arrêt qui ajoute sont effet de blindage électrostatique à celui de la grille écran fait que la capacité anode grille est très faible ($C_{ag} < 0{,}01$ pF).

d) La pente restant égale à celle de la triode équivalente, la résistance interne et le facteur d'amplification peuvent avoir des valeurs nettement plus élevées :

$$\begin{aligned} 50\ \text{k}\Omega &< \rho < 5\ \text{M}\Omega \\ 250 &< K < 5\,000 \\ 1\ \text{mA/V} &< S < 12\ \text{mA/V}. \end{aligned}$$

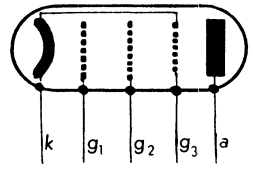
e) Les caractéristiques dynamiques sont confondues avec les caractéristiques statiques.

3° Caractéristiques (fig. 1-27).

Les caractéristiques I_a (V_g) des pentodes ordinaires sont semblables à celles des triodes.

(1) De nombreux montages déphaseurs à tubes ordinaires évitent l'emploi de ces tubes spéciaux coûteux.

Les caractéristiques I_a (V_a) présentent un palier à partir d'une tension anodique de l'ordre de 50 V montrant ques les variations de la tension ano-



Représentation schématique

Fig. 1-26

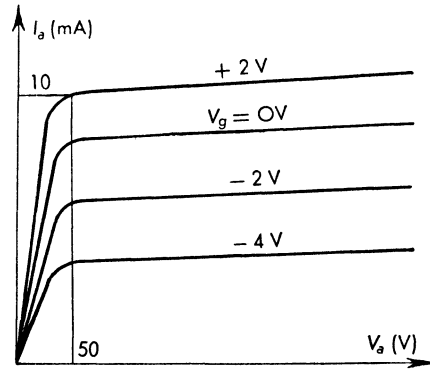


Fig. 1-27.
Pentode. — Caractéristiques I_a (V_a).

dique n'ont pratiquement plus d'action sur le courant. Pour cette partie de la caractéristique le tube fonctionne en régime de saturation.

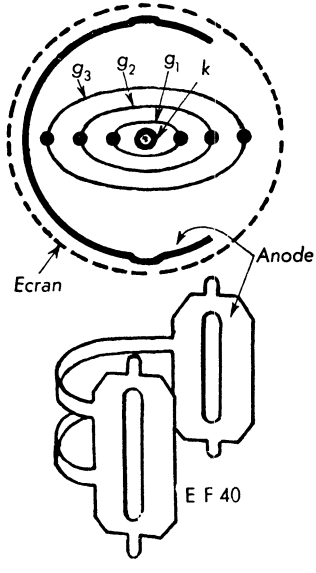


Fig. 1-28 et Fig. 1-29.
Pentode.

4° Comparaison triode, pentode.

Les propriétés les plus importantes qui permettent un choix entre triode et pentode sont résumées dans le tableau ci-après.

5° Différents types.

a) Pentodes amplificatrices de tension.

Pentodes à gain fixe.

L'énergie dissipée sur l'anode étant peu élevée elle est en nickel brillant non traité.

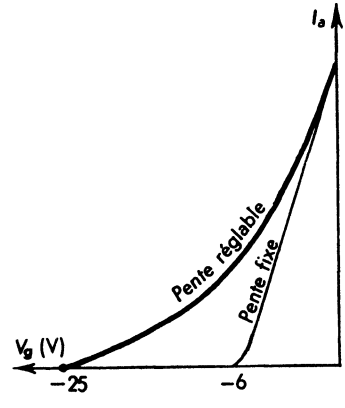


Fig. 1-30 et Fig. 1-31.
Pentode à gain réglable.

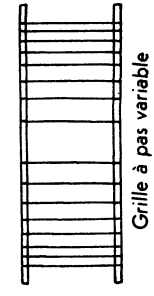


TABLEAU 1-2. — COMPARAISON TRIODE-PENTODE

	TRIODE	PENTODE
S max	12 mA/V	12 mA/V
ρ max	60 kΩ	5 MΩ
K	100	5 000
Amplification	$A = K\,R_a/(\rho + R_a)$	$A \approx S\,R_a$
C_{ag} max	10 pF	0,01 pF
Caractéristique I_a (V_a)	I_a varie avec V_a	$I_a \approx$ C^{te} si $V_a > 50$ V
Rendement classe A	25 %	50 %
Rendement classe B	40 %	80 %
Harmoniques	pairs	impairs
Risques d'accrochages	<	>
Temps de transit	<	>
Bruit de fond	<	>
Transmodulation	<	>
Câblage	plus simple	plus délicat

Le circuit d'anode doit être efficacement séparé du circuit de grille de commande. En conséquence les pas des grilles g_2 et g_3 seront assez serrés. Les figures 1-28 et 1-29 montrent un exemple constructif d'une telle pentode.

Pentodes à gain réglable.

Une caractéristique du type de celle indiquée à la figure 1-30 peut être obtenue au moyen d'une grille à pas variable (fig. 1-31). La coupure se produit pour une polarisation nettement plus négative. Lorsque la polarisation est suffisamment négative les électrons sont repoussés aux endroits où les spires sont serrées. L'émission de la cathode est limitée à certains endroits (effet d'îlot) (fig. 1-32). Ces pentodes sont utilisées dans les montages à commande automatique de sensibilité (anti-fading).

Pentodes pour amplificateurs à large bande.

Ces pentodes utilisées dans les amplificateurs « vidéo » en télévision nécessitent des pentes élevées. Nous avons vu qu'on obtient de fortes pentes en diminuant la distance grille cathode et en réduisant le pas de la grille de commande.

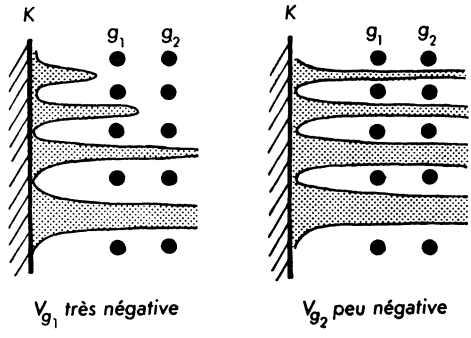


Fig. 1-32.
Pentode à gain réglable.

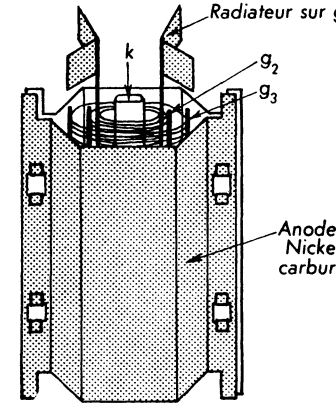


Fig. 1-33.
Pentode de puissance.

b) Pentodes de puissance.

L'énergie dissipée sur l'anode étant importante elle est en nickel carburé. La cathode plate a une surface émissive beaucoup plus grande. La grille de commande est surmontée d'ailettes de refroidissement (radiateur de grille). Les grilles g_2 et g_3 ont un pas plus lâche que celles des pentodes amplificatrices de tension.

Ces pentodes dont la figure 1-33 montre un exemple sont utilisées dans les étages de sortie des amplificateurs et récepteurs.

Les pentodes de puissance à anode dite « cavitrap » sont des tubes à faisceau électronique comportant une anode compartimentée grâce à laquelle l'émission secondaire est réduite au minimum (PL 500 utilisée pour le balayage lignes). Les pentodes de puissance 6FN5 utilisées aussi pour le balayage lignes des cinescopes 110° ont une anode en « sandwich » constituée d'une âme en cuivre plaquée de part et d'autre d'acier recouvert d'aluminium noirci. L'ensemble a pour but de permettre une dissipation de chaleur plus élevée. Le tube EL502 d'encombrement plus réduit possède une embase magnoval.

E - Tubes à plus de trois grilles.

1° Définition.

L'*hexode*, l'*heptode*, l'*octode* (1) sont des tubes électroniques comportant 6, 7 ou 8 électrodes.

(1) Il existe un tube à 9 électrodes, l'ennéode EQ 80 utilisé comme détecteur de phase en FM.

2° Principe.

Ces tubes sont utilisés dans les récepteurs superhétérodynes (à changement de fréquence) où ils jouent le rôle de mélangeurs du type multiplicatif.

La haute fréquence reçue f_1 est appliquée à l'une des grilles. Une deuxième fréquence f_2 créée par un montage oscillateur est appliquée à une autre grille du tube. Le flux électronique est soumis à l'influence des deux grilles. Il se produit un phénomène de battements dont la fréquence $F = f_1 - f_2$ est recueillie dans le circuit d'anode.

I a pente d'un tel tube, dite *pente de conversion*, se définit comme précédemment avec la différence que la fréquence du courant d'anode est différente de la fréquence de la tension d'entrée qui lui a donné naissance. C'est le quotient de la composante du courant anodique par la tension sinusoïdale d'entrée appliquée.

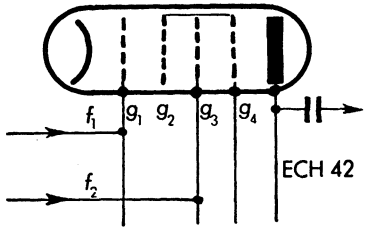


Fig. 1-34. — Hexode

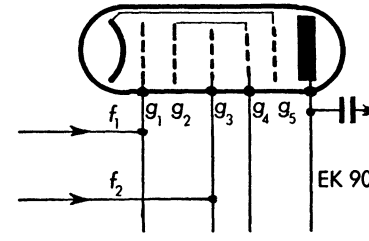


Fig. 1-35. — Heptode.

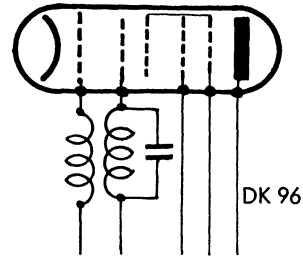


Fig. 1-36. — Heptode oscillatrice mélangeuse.

3° Différents types.

Les figures 1-34 et 1-35 donnent les schémas équivalents d'une hexode et d'une heptode. Les deux fréquences à mélanger sont appliquées aux grilles g_1 et g_3. Les grilles g_2 et g_4 reliées ensemble sont portées à un potentiel positif fixe pour former un écran électrostatique évitant toute réaction entre les circuits de fréquence f_1 et f_2.

L'heptode comporte en plus une grille d'arrêt g_5.

L'hexode oscillatrice-mélangeuse (fig. 1-36) a la grille g_2, jouant le rôle d'anode de l'oscillatrice, réduite généralement à ses deux montants sans aucun spiralage.

F - Tubes multiples.

1° Définition.

On appelle tube multiple un tube électronique contenant dans une même enveloppe deux ou plusieurs groupes d'électrodes associées à des faisceaux électroniques indépendants.

2° Différents types.

Les principales combinaisons peuvent être désignées comme suit : double diode, double triode, double diode-triode, diode-pentode, double diode-pentode, triode-pentode, triode-hexode.

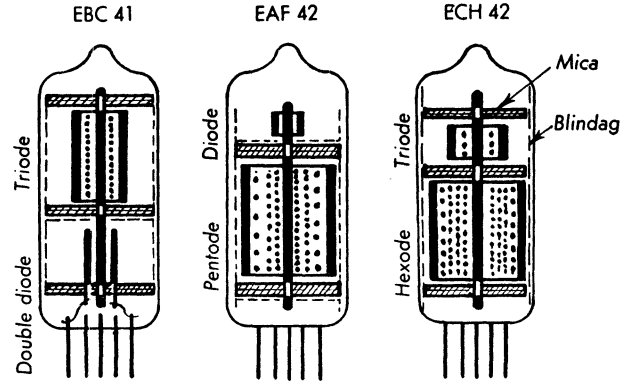


Fig. 1-37 à Fig. 1-39. — Tubes multiples.

Leurs avantages résident dans une diminution du prix de revient, de l'encombrement et dans un raccourcissement des connexions.

Les groupes d'électrodes sont souvent séparés par des écrans évitant les couplages parasites.

Parmi les plus courants citons : les diodes-triodes (fig. 1-37) dont la partie triode comme amplificatrice AF de tension ; les diodes-pentodes (fig. 1-38) dont la partie pentode est utilisée en amplificatrice RF, FI ou AF ; les triodes-hexodes dont la partie triode est montée en oscillatrice et la partie hexode en mélangeuse de fréquences (fig. 1-39) ; les doubles triodes ont été étudiées au paragraphe B.

Compactron : C'est le nom donné à de nouveaux tubes américains comportant 3 ou 4 groupes d'électrodes dans la même enveloppe. Les dimensions sont réduites (∅ 28 mm, hauteur 30 à 75 mm, culot 12 broches) et ils peuvent concurrencer à ce point de vue les montages à transistors. Exemple : récepteur 5 tubes ou 7 transistors réalisé avec 2 compactrons.

II. TUBES A VIDE PROFESSIONNELS.

A - Généralités.

On appelle tubes professionnels des tubes électroniques dont les procédés spéciaux de réalisation et les structures renforcées permettent d'augmenter la durée de vie moyenne.

Nous incorporerons dans les tubes professionnels les tubes à utilisations particulières qui possèdent des structures spéciales en vue de certaines applications.

B - Différents types.

1° Tubes renforcés.

Ce sont des tubes qui ont été mis au point à l'origine pour des applications aéronautiques. Ils appartiennent la plupart à la série miniature car leurs petites dimensions leur permettent de mieux résister naturellement aux accélérations.

La meilleure fixation des électrodes, la réduction des jeux, le doublement des micas leur permettent de résister plus longtemps aux chocs et aux vibrations. Leur durée de vie est augmentée.

2° Tubes de sécurité.

a) Propriétés.

Les tubes de sécurité ont non seulement une grande résistance aux chocs et aux vibrations mais ils possèdent une grande sécurité de fonctionnement. Leur probabilité élevée de bon fonctionnement pendant un temps déterminé et dans des conditions définies les désignent pour toutes les applications où une panne inopinée peut avoir des conséquences graves (équipements à bord d'avions, dispositifs de commande industriels...).

Les caractéristiques nécessaires à de tels tubes sont obtenues par :

— une structure renforcée,
— des matières premières spécialement choisies,
— des traitements thermiques et chimiques poussés,
— des contrôles soignés,
— des essais sévères, en particulier les essais de chocs, de vibrations, de fonctionnement intermittent et de durée dans les conditions les plus défavorables.

Les tubes de sécurité doivent avoir une probabilité de panne quasi nulle pendant 500 heures de fonctionnement dans les conditions extrêmes.

Leur remplacement doit être fait périodiquement même s'ils n'ont aucun défaut.

Dans les types de tubes en version sécurité on trouve :

— Quelques tubes classiques à culot octal.

— Un grand nombre de tubes miniatures ou normal.

— La plupart des tubes subminiatures qui permettent des équipements compacts.

b) Code de désignations.

L'anarchie règne dans la désignation des tubes de sécurité qui sont repérés soit par des suffixes placés à la suite des désignations conventionnelles (*S*, *W*, *WA*, *S-H*, *WA-H*) soit par des nombres des séries 5 000 ou 6 000, soit encore par des étoiles (5 étoiles) ou des points verts.

Exemples. 6 *AM* 6 *S*, 6 *X* 4 *W*, 12 *AT* 7 *WA*, 5 639, 6 206, etc.

3° Tubes « longue durée ».

Ce sont des tubes garantis pour un fonctionnement de plusieurs milliers d'heures. Leur durée garantie varie de 5 000 à 10 000 heures. Ils sont destinés aux amplificateurs (répéteurs) des circuits téléphoniques à grand nombre de voies et longue distance (faisceaux hertziens et câbles coaxiaux).

La durée de vie considérée ici est une durée moyenne alors que la durée considérée pour les tubes de sécurité est une durée, minimale sans pannes dans des conditions de fonctionnement sévères.

Les spécifications d'utilisation données par un même constructeur pour un même type de tube sont données dans le tableau 1-3.

TABLEAU 1-3. — SPÉCIFICATIONS D'UTILISATION

	V_a max (V)	Dissipation anodique max (W)	I_a max (mA)	I_f
Classique	300	2,5	20	6,3 V ± 10 %
Sécurité	450	5	20	6,3 ± 10 %
Longue durée .	275	1,75	15	6,3 ± 5 %

4° Tubes à utilisations particulières.

a) Tubes miniatures ou sub-miniatures à chauffage direct, appelés encore « tubes batteries ».

Ils sont destinés à l'équipement de récepteurs portatifs amateurs ou professionnels, aux télécommunications à petite puissance, magnétophones et équipements divers de mesure pour missions scientifiques, appareils de prothèse auditive (concurrencés largement par les transistors).

Ils sont à chauffage direct sous des tensions de 0,625 — 1,25 ou 1,4 V.

Etant donné le faible diamètre du filament de chauffage qui a une très faible résistance aux surcharges, les conditions de fonctionnement doivent être strictement observées. Le montage du filament doit respecter les polarités sous peine de perturber le fonctionnement. Dans le cas où les filaments sont montés en série il est nécessaire de prévoir des résistances de dérivations de façon à équilibrer les courants qui les traversent. Des découplages entre étages sont prévus puisqu'ils sont traversés par les composantes alternatives des courants cathodiques.

La finesse des filaments les rend sensibles aux vibrations et à l'action du champ magnétique du haut-parleur qui peut le soumettre à des efforts pouvant amener leur rupture. (Placer les tubes en dehors du champ du haut-parleur ou choisir un haut-parleur à très faible flux de fuite).

b) Tubes électromètres.

Ils sont destinés à mesurer ou à déceler soit des tensions de très faibles valeurs provenant de sources ayant une résistance interne élevée, soit des courants très faibles circulant dans des circuits de grande résistance. Ce sont des tubes à vide élevé.

Ils comportent une anode, deux grilles et une cathode. La première grille est une grille accélératrice (ou à charge d'espace) ayant pour but de repousser les ions positifs émis par la cathode. Sa présence réduit le courant inverse de la grille de commande au dixième de sa valeur habituelle.

La deuxième grille est la grille de commande (ou grille de mesure). Pour obtenir un fort isolement de cette grille sa sortie se fait sur le sommet du tube. Elle est portée à un potentiel négatif de faible valeur.

L'anode est portée à un potentiel positif légèrement supérieur à celui de la grille accélératrice. L'alimentation réduite permet l'utilisation sur accumulateurs ou piles. ($V_a < 10$ V)

— capacité d'entrée faible
— résistance d'entrée : 10^{15} Ω
— courant d'anode : 25 à 75 μ A
— courant de grille de commande : 10^{-14} A max.

On peut mesurer des courants allant jusqu'à 10^{-14} ampère et des tensions de l'ordre de quelques microvolts (mesures de vide par jauges d'ionisation, mesures de fuite sur les isolants à haute tension, mesures photoélectriques, spectromètres de masse, etc.).

c) Nuvistors.

Ce sont les tubes à structure métal-céramique de faibles dimensions (à peine plus grandes que celles d'un transistor) utilisés en modulation de fréquence, en télévision et jusqu'à 1 200 MHz. Leur encombrement et leur consommation très faibles permettent de les associer aux transistors pour former des montages hybrides capables de performances inaccessibles aux transistors seuls. Le temps de transit, le facteur de bruit (2 à 4 dB) et les inductances parasites sont faibles.

Particularités constructives

— pas de verre : enveloppe métallique, embase céramique;
— pas de mica : électrodes brasées à des cônes métalliques eux-mêmes brasés à des trépieds traversant l'embase;
— pas de dégazeur : fermeture et pompage directs à 1 000 °C sur un piège à air liquide. Vide très poussé obtenu par simple pompage;
— centrage rigoureux des électrodes.

Fiabilité exceptionnelle (1)

— fonctionnement jusqu'à une température d'enveloppe de 350 °C;
— résistance exceptionnelle aux vibrations et aux chocs;
— faible dispersion des caractéristiques;
— excellente résistance aux radiations de toute nature.

III. TUBES D'ÉMISSION (2).

A - Généralités.

Le fonctionnement des tubes d'émission ne diffère pas dans son principe de celui des tubes de réception. Ce qui diffère c'est la mise en jeu de puissances élevées avec forte dissipation de chaleur.

On peut les caractériser par :
— le nombre d'électrodes,
— le type de cathode utilisée,
— la puissance de sortie,
— la tension maximale d'anode.

Le choix des matériaux, la forme des éléments et le mode de refroidissement sont liés à la puissance et il est logique de faire l'étude technologique de ces tubes d'après la puissance.

B - Tubes pour faibles puissances : 10 W à 1 kW (fig. 1-40).

1° Cathodes.

Jusqu'à 100 W on utilise des cathodes à oxydes à chauffage indirect et au-dessus des cathodes à oxydes à chauffage direct.

(1) La « fiabilité » est la qualité d'un matériel électronique que l'on définit par la probabilité d'accomplir sans défaillance une fonction déterminée dans des conditions d'emploi données et pendant un temps donné.

(2) Les tubes d'émission pour hyperfréquences seront examinés au paragraphe V.

2° Anodes.

Jusqu'à 100 W, elles sont en nickel carburé, munies d'ailettes de refroidissement. Au-dessus elles sont en graphite usiné qui supporte de plus fortes densités de courant.

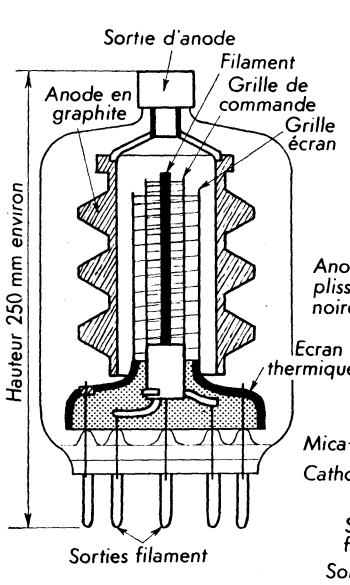


Fig. 1-41.
Tétrode pour puissance moyenne.

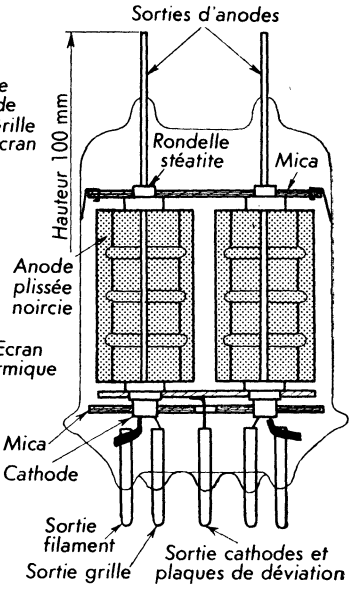


Fig. 1-40.
Double tétrode pour faible puissance.

3° Grilles.

Elles sont en molybdène doré afin d'éviter l'émission secondaire de grille. Le fil enroulé en hélice est soudé aux montants surmontés de radiateurs.

4° Enveloppes.

Elles sont en verre tendre au plomb ou à la chaux, le verre au plomb étant réservé aux tubes à température de régime élevée. L'embase est scellée à l'ampoule par pressage ou par frittage. Pour certains tubes l'anode est connectée à une corne sortant au sommet de l'ampoule. Les traversées sont en copperclad ou en ferrochrome.

5° Refroidissement.

Il se fait à air par convection naturelle comme pour les tubes de réception.

6° Particularités de construction.

Les tubes d'émission étant soumis à un dégagement de chaleur plus important qu'en réception le dégazage doit être plus poussé lors de la fabrication pour éliminer les gaz occlus.

Les pièces isolantes entre électrodes sont éliminées en H.F. à cause des pertes diélectriques importantes dues au champ H.F. intense. Pour cette raison, ainsi que pour éviter les déformations d'électrodes sous l'influence de la chaleur, le montage doit être très rigide.

La grille écran des tétrodes et pentodes est reliée à une coupelle qui intercepte la chaleur rayonnée par l'anode et le filament, empêchant un chauffage excessif du pied du tube. Elle constitue une connexion non inductive entre les broches et la grille écran elle-même.

Le filament peut être supporté par une tige centrale à l'aide d'un ressort qui compense les dilatations.

Le dégazeur (getter) évaporé se dépose sur la paroi du tube sous forme d'un miroir de baryum.

C - Tubes pour puissances moyennes : 1 kW à 20 kW (fig. 1-41).

1° Cathodes.

Elles sont en tungstène thorié à chauffage direct. Une carburation accélère l'activation et diminue la vaporisation ultérieure du thorium.

2° Anodes.

Jusqu'à 5 kW elles sont en graphite usiné et pour des puissances supérieures en molybdène (quelquefois en tantale).

Le choix du molybdène est justifié car il supporte des températures plus élevées que le nickel et se travaille beaucoup plus facilement que le tungstène. Au-dessus de 5 kW dans le cas du refroidissement par air forcé, l'anode est en cuivre.

Les pouvoirs de dissipation des différents métaux utilisés dans la construction des anodes pour tubes de petites et moyennes puissance sont les suivants : nickel 1 W/cm², nickel carburé 2 W/cm², tantale sablé 2 W/cm², molybdène 3 à 4 W/cm² et molybdène zirconié 4 à 5 W/cm².

3° Grilles.

Les grilles de commande sont en molybdène platiné, enroulées en hélice ou à fils parallèles (fig. 1-42).

Les grilles écran des tétrodes sont en molybdène zirconié. Le zirconium améliore le rayonnement de la chaleur produite par ces grilles et à chaud il fixe les gaz résiduels. Pour augmenter la dissipation de chaleur, la grille peut être surmontée d'un cône massif de forte section (fig. 1-42).

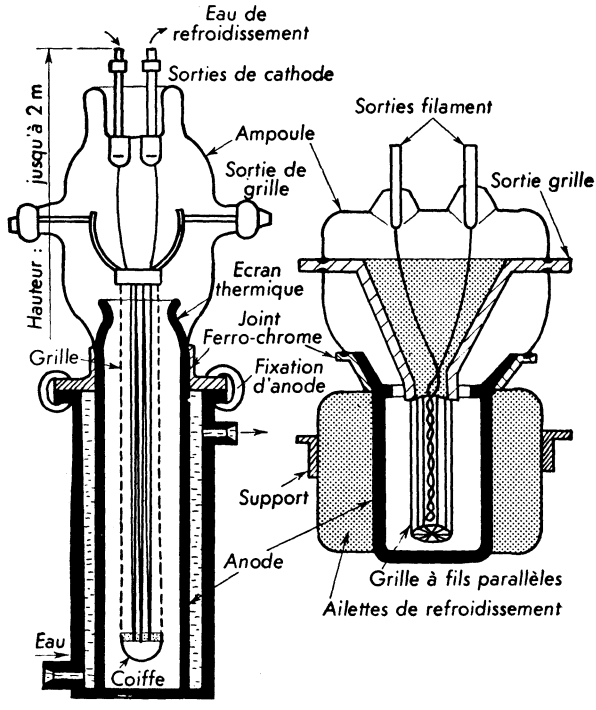


Fig. 1-42.
Triode de grande puissance.

Fig. 1-43.
Triode de puissance moyenne.

4° Enveloppes.

Elles sont en verre dur (borosilicaté) dont le point de ramollissement est plus élevé supportant ainsi de plus hautes températures.

Dans le cas de refroidissement forcé une partie de l'enveloppe est constituée par l'anode en cuivre.

5° Refroidissement.

Il se fait à air par convection naturelle. La dissipation anodique maximale qui peut être évacuée de cette façon est de 5 kW environ. Au-dessus, on utilise le refroidissement à air forcé (fig. 1-44). L'anode se trouve alors dans un refroidisseur constitué par une chemise isolante en stéatite, comportant des ailettes longitudinales brasées sur l'anode.

A la partie inférieure, un ventilateur de construction soignée (silencieux, exempt de vibrations) souffle l'air dans le radiateur. Il est relié au radiateur par l'intermédiaire d'un tuyau souple en soie naturelle à mailles fines et à double paroi. L'installation comporte un bilame de sécurité qui doit par l'intermédiaire d'un relais arrêter le fonctionnement lorsque le refroidissement devient insuffisant pour une cause quelconque. Le débit est de plusieurs mètres cubes par seconde.

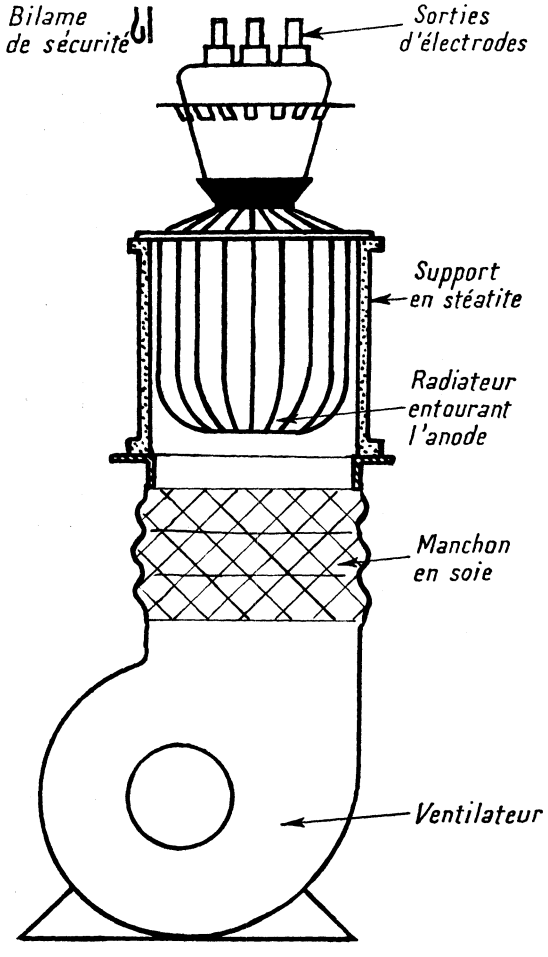


Fig. 1-44. — Refroidissement par air forcé.

6° Particularités de construction.

Celles qui ont été signalées pour les tubes de petite puissance sont encore valables ici. Pour les moyennes puissances on utilise surtout des triodes

et à un degré moindre des tétrodes. Les dégazeurs sont généralement constitués par du zirconium appliqué à l'état finement divisé sur l'anode.

Les particularités concernant les sorties d'électrodes et les liaisons métal verre sont les mêmes que celles examinées pour les tubes de forte puissance.

D - Tubes pour grandes puissances : 20 kW à 400 kW (fig. 1-43).

1° Cathodes.

Elles sont à chauffage direct.

Jusqu'à 100 kW on utilise des cathodes en tungstène thorié. Au-dessus elles sont en tungstène pur qui supporte des températures plus élevées mais il est plus difficile à travailler et nécessite une puissance de chauffage plus grande.

Elles sont constituées par des barres ou une douzaine de brins parallèles de 1 mm de diamètre tendus en zig-zag sur les génératrices d'un cylindre. Les bornes de connexion sont en molybdène. Le niveau de ronflement peut être diminué par une prise médiane ou, pour les cathodes en tungstène qui y sont plus sensibles, par l'alimentation en courant triphasé.

2° Anodes.

Elles sont en cuivre et constituent une partie de l'enveloppe.

3° Grilles.

Elles sont en molybdène platiné supportées par des barres en molybdène. Dans les tubes de très forte puissance, la grille très chargée est en tungstène. L'extrémité de la grille est prolongée par une coiffe évitant l'effet couronne.

Le refroidissement des électrodes se fait par jet d'air ou circulation d'eau sur les bornes de connexion.

4° Enveloppes.

Elles sont constituées en partie par l'anode surmontée par une coupe de verre traversée par les conducteurs d'alimentation de la cathode et des grilles. Lorsqu'elle est bien protégée de la chaleur elle peut être en verre tendre, liée à l'anode par une bague en ferro-chrome (soudable au verre tendre). Dans le cas contraire on utilise du verre dur avec une bague en fernico.

5° Refroidissement.

Il peut être réalisé de trois façons :

a) Par circulation fractionnée d'air forcé.

Cette méthode est utilisable jusqu'à 50 kW. Lorsqu'on emploie une circulation d'air le long de l'anode il s'échauffe progressivement et ne peut plus

évacuer suffisamment de chaleur dans la partie haute. On obvie à cet inconvénient en subdivisant le trajet d'air en un certain nombre de canaux horizontaux dans chacun desquels l'air ne parcourt qu'un petit trajet ce qui permet de régulariser la température tout le long de l'anode.

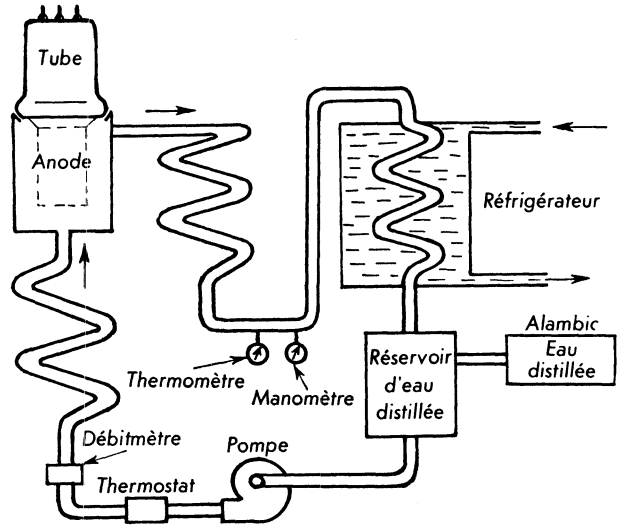


Fig. 1-45. — Circuit de refroidissement par eau.

b) Par circulation d'eau (fig. 1-45).

L'anode est placée dans un refroidisseur constitué par une enveloppe concentrique à l'anode. L'eau de refroidissement s'écoule entre les parois avec un débit de 50 à 150 l/mn. Pour augmenter la vitesse d'évacuation de la chaleur on soude un ruban en hélice sur la paroi du refroidisseur qui a pour but d'augmenter la turbulence de l'eau dans le cas de tubes à forte dissipation.

La tension anodique étant élevée, il faut que la résistance d'isolement entre l'anode et la terre soit grande d'où l'emploi d'eau distillée, de tuyaux d'amenée et d'évacuation assez longs en matière plastique ou en céramique enroulés sur un tambour et maintenus par des supports en stéatite.

Ce système de refroidissement assez compliqué demande une installation importante et n'est utilisé que pour de très fortes puissances.

c) Par vaporisation d'eau. « Tubes Vapotron » utilisés dans les installations « Vapodyne » mis au point en 1950 par la C.F.T.H. (fig. 1-46).

L'anode baigne dans un fourreau contenant quelques litres d'eau seulement (fig. 1-47). Elle est hérissée de dents en cuivre qui augmentent la surface de contact avec l'eau. Une collerette assure l'étanchéité. La chaleur dégagée par l'anode amène l'eau à l'ébullition qui absorbe 500 kcal par kg d'eau vaporisé. La dissipation anodique atteint 120 W/cm^2 soit deux fois

celle obtenue avec le refroidissement par eau et trois fois celle du refroidissement par air (1). La chaleur dégagée peut être utilisée par exemple pour le chauffage de la salle d'émission et la production industrielle d'eau distillée. Les avantages du système sont la simplicité, l'augmentation du rendement, la diminution de l'encombrement, la possibilité de supporter des surcharges pendant un temps très court et le silence.

Ce système de refroidissement peut être utilisé pour des puissances allant de 10 kW à 300 kW.

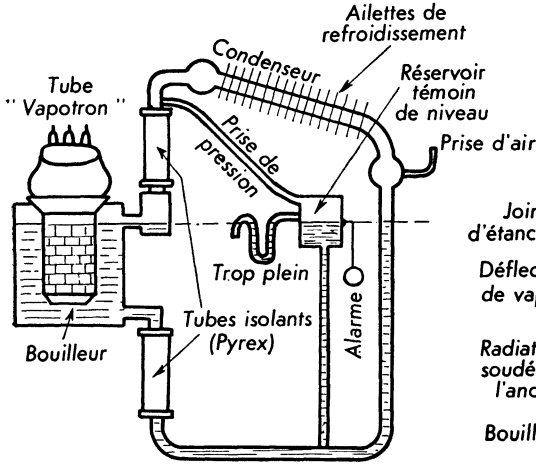


Fig. 1-46.
Système « Vapodyne ».

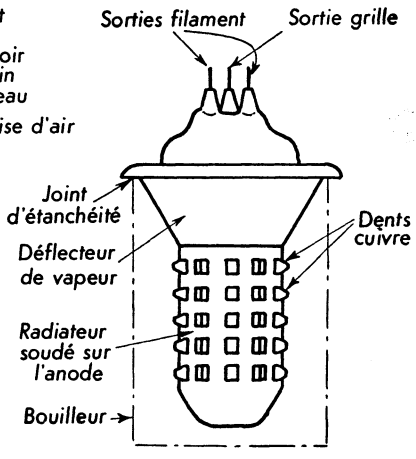


Fig. 1-47.
Tube Vapotron.

6° Particularités de construction.

Les tubes de cette catégorie sont uniquement des triodes. Les capacités inter-électrodes étant importantes il faut neutrodyner. Le vide des tubes de grande puissance est difficile à obtenir et peut demander plusieurs jours. Le dégazage des tubes à refroidissement par eau ne peut être obtenu par chauffage H.F.; il s'effectue dans un four. Les traversées d'électrodes se font par des coupelles en ferro-chrome (avec verre tendre) ou en fernico (avec verre dur). Le dégazeur est constitué par du zirconium déposé sur l'anode.

E - Code des tubes d'émission.

Chaque constructeur possède son propre code plus ou moins détaillé. Ci-dessous nous donnons le code « Philips ».

Exemple :

Tube *T B W* 12/100

Triode H.F. ← | | | → dissipation anodique max. 100 kW.
Tungstène thorié ← ↓ → Tension d'anode 12 kV.
refroidissement par eau.

(1) La dissipation anodique a été portée à 800 W/cm² sur une tétrode de 25 kW de construction récente (1962).

TABLEAU 1-4. — CODE DES TUBES D'ÉMISSION

1re lettre	2e lettre	3e lettre	1er nombre	2e nombre	Lettres finales	
Fonction	Chauffage	Gaz ou refroidissement	Tension	Puissance	Culot	
D : redresseur	A : tungstène chauffage direct	Rien : refroidissement naturel	Tension max. d'anode en kV	Puissance de sortie ou dissipation anodique pour tubes de modulation en W ou kW	A : européen 4 broches	G : américain 4 broches
T : triode H.F.	B : tungstène thorié chauffage direct	L : refroidissement par air forcé			B : fils	GB : Jumbo 4 broches
Q : tétrode	C : oxydes chauffage direct	W : refroidissement par eau			E : américain 7 broches	N : américain 5 broches
P : pentode	E : oxydes chauffage indirect	G : vapeur de Hg			ED : Vis Edison	P : transcontinental
M : triode modulatrice		X : xénon			EG : Goliath	

TABLEAU 1-5. — TUBES D'ÉMISSION

	Puissance	Cathodes	Anodes	Grilles	Dégazeurs	Refroidissement	
Petites P	10 W	Oxyde Chauffage indirect	Nickel Carburé	Molybdène doré	Baryum	A air naturel	
	100 W	Oxydes Chauffage direct	Graphite usiné				
	1 kW	Tungstène thorié		Molybdène platiné	Zirconium		
Moyennes P	5 kW		Molybdène			Air forcé	
	20 kW						10 kW
Grandes P	100 kW	Tungstène	Cuivre électrolytique	Tungstène		Air fractionné 50 kW	Vaporisation d'eau
	400 kW					Eau	300 kW

F - Utilisations.

Les tubes d'émission sont, non seulement utilisés pour toutes les fonctions que nécessitent l'installation d'un poste émetteur mais aussi pour toutes les applications industrielles qui nécessitent la production d'oscillations avec une puissance suffisante. Nous pouvons citer entre autres :

— le chauffage H.F. utilisé pour les traitements de surface de pièces métalliques, le dégazage des électrodes, la fabrication des semi-conducteurs,

— le chauffage par pertes diélectriques qui permet le chauffage des matières plastiques avant leur mise en forme,

— les générateurs d'ultrasons par piézoélectricité ou magnéto-striction,

— la diathermie qui consiste à traiter certaines maladies par un chauffage localisé des tissus au moyen de courants H.F.,

— l'alimentation des installations à rayons X par des kénotrons redressant des tensions de 50 kV à 200 kV pour un courant de quelques dizaines de mA.

IV. TUBES CATHODIQUES.

A - Généralités.

1° Principe.

Les tubes cathodiques (ou à rayons cathodiques) font partie des tubes à faisceau électronique dans lesquels le flux d'électrons émis par la source se déplace en étant confiné dans une région déterminée de l'espace.

Les principaux tubes à faisceau électronique sont les tubes cathodiques, les tubes analyseurs d'image, les tubes hyperfréquence.

Les tubes cathodiques que nous examinons dans ce paragraphe peuvent être classés de la façon suivante :

- Ecran fluorescent usuel
  - Déviation magnétique
    - Indicateurs de radar
    - Cinescopes pour télévision
  - Déviation électrostatique
    - Oscilloscopes
    - Indicateurs cathodiques
    - Tubes compteurs
- Ecran fluorescent à mémoire électrostatique
  - Tubes à mémoire
  - Tubes à entretien d'image.

2° Définitions.

a) Aspect extérieur (fig. 1-48).

— *Col* : Petite partie tubulaire adjacente à l'embase.

— *Cône ou robe* : Partie évasée en général conique de l'enveloppe du tube.

— *Fond* : Partie de l'enveloppe en verre à travers laquelle est observée ou projetée l'image.

— *Ecran* : Surface sur laquelle se produit l'image visible dans un tube cathodique.

— *Spot* : Petite tache produite instantanément sur l'écran par l'impact du faisceau cathodique.

— *Trace du spot* : Trajectoire du spot.

b) Electrodes (fig. 1-49).

— *Canon électronique* : Système d'électrodes ayant pour objet de produire et de concentrer un faisceau électronique.

— *Electrode d'accélération* : Electrode dont le potentiel crée un champ électrique ayant pour effet d'accroître la vitesse des électrons d'un faisceau électronique.

— *Electrode de concentration* : Electrode dont le potentiel est ajusté de manière à produire la convergence des rayons d'un faisceau électronique.

La concentration peut être obtenue au moyen d'un champ magnétique (bobine ou aimant) ou d'un champ électrique.

— *Electrode de déviation* : Electrode dont le potentiel crée un champ électrique ayant pour effet de dévier un faisceau électronique.

La déviation peut être commandée par un champ électrique (plaques de déviation constituant les armatures d'un condensateur) ou par un champ magnétique (collier comprenant les bobinages et circuits magnétiques permettant d'obtenir la déviation).

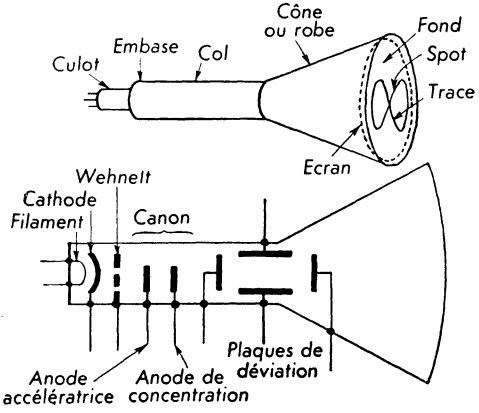


Fig. 1-48 et Fig. 1-49.
Oscilloscope.

— *Electrode de modulation* : Electrode de commande dans le cas d'un tube à faisceau cathodique. Elle joue le rôle d'une grille de commande.

— *Electrode post-accélératrice* : Electrode dont le rôle est d'accroître la vitesse des électrons en fin de trajectoire après déviation.

c) Luminescence.

— *Luminescence* : Processus par lequel la matière (substance luminescente) émet un rayonnement électromagnétique dont l'intensité pour certaines longueurs d'onde définies est supérieure à celle du rayonnement thermique à la même température.

— *Fluorescence* : Luminescence qui cesse un temps très court après l'excitation.

— *Phosphorescence* : Luminescence qui persite un temps appréciable après l'excitation.

— *Luminescence cathodique* (cathodoluminescence) : Luminescence provoquée par des rayons cathodiques ou des rayons bêta (électrons émis par des substances radioactives).

— *Activateur* : Impureté ou atome déplacé qui a pour effet d'accroître le rendement de la luminescence.

— *Sensibilisateur* : Impureté ou atome déplacé qui modifie la répartition spectrale de l'excitation d'une substance luminescente.

— *Base* d'une substance luminescente : Constituant cristallin dominant d'un solide luminescent.

— *Extincteur* : Substance introduite dans un corps luminescent afin de réduire la durée de la phosphorescence.

— *Poison* : Impureté qui dans un corps luminescent a pour effet de réduire le rendement de la luminescence.

— *Liant* : Produit servant à faire adhérer une substance luminescente sur un support tel que verre d'une lampe ou le fond d'un tube cathodique.

— *Déclin* : Décroissance de la luminescence après cessation de l'excitation. La durée du déclin s'appelle la *persistance.*

— *Fatigue* : Décroissance de la luminescence qui se produit lorsque la substance est exposée d'une manière continue à un rayonnement.

d) Fonctionnement.

— *Rayon électronique* : Trajectoire individuelle d'un électron dans un faisceau.

— *Densité d'un faisceau* : Densité en un point donné du courant transporté par des électrons.

— *Première convergence* : Première concentration du faisceau qui a lieu dans le canon.

— *Défocalisation* : Défaut caractérisé par la variation de la section du faisceau en fonction de sa distance à l'axe du tube et dont l'effet est d'agrandir le spot.

— *Tension de blocage* : Tension anodique au-dessous de laquelle le taux d'émission secondaire de l'écran est inférieur à l'unité. L'écran prend alors une charge négative qui repousse les électrons incidents.

— *Sensibilité de déviation* : Quotient du déplacement infinitésimal du spot par la variation correspondante de la tension de déviation (déviation électrique) ou par la variation correspondante de l'intensité dans la bobine (déviation magnétique).

— *Coefficient de déviation* : Inverse de la sensibilité de déviation.

— *Distorsion en trapèze* : Défaut d'un tube cathodique qui transforme en trapèze une image qui devrait être rectangulaire.

— *Distorsion du spot* : Défaut d'un spot dont la forme n'est pas circulaire.

— *Hyperluminosité du spot* : Excès de luminosité du spot dû à une intensité trop élevée du faisceau.

— *Halo* : Région annulaire entourant un spot, moins lumineuse que le spot, due à une réflexion de la lumière émise par le spot sur les faces avant et arrière du fond du tube.

B - Oscilloscopes cathodiques.

1° Généralités.

a) Définition.

— *Oscilloscope cathodique* : C'est un tube cathodique donnant une image visible, observée directement, qui est une représentation graphique d'une grandeur variable dans le temps.

L'appareil de mesure qui utilise un oscilloscope cathodique s'appelle *oscillographe cathodique* (NF C 01-020 et C 42-700).

L'écran luminescent fait apparaître l'image plus lumineuse que le fond (1).

b) Principe de fonctionnement (fig. 1-49).

L'oscilloscope est un tube à vide (10^{-6} mm de Hg) à cathode chaude dont le flux d'électrons est contrôlé par une électrode (wehnelt) qui peut être portée à une tension négative par rapport à la cathode comprise entre 0 et — 40 V. Elle permet de régler la *brillance* (ou luminosité). Le faisceau électronique, après avoir passé par le trou du wehnelt est focalisé par le canon à électrons qui doit donner un spot aussi réduit que possible. Le canon à électrons comprend une ou deux anodes accélératrices portées à un potentiel de l'ordre de 1 000 à 2 000 V ayant pour but d'augmenter la vitesse des électrons et une anode de concentration portée à un potentiel de 500 à 1 000 V. C'est en ajustant cette tension que l'on règle la *finesse* du spot (ou convergence).

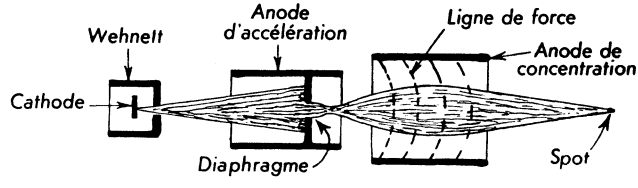


Fig. 1-50. — Forme du faisceau.

La trajectoire des électrons qui résulte de leur inertie et des forces électriques auxquelles ils sont soumis, est assez compliquée. La figure 1-50 en montre le principe.

(1) Certains écrans absorbants permettent d'obtenir une trace sombre sur un fond clair (skiatron).

Ces anodes sont appelées aussi lentilles électrostatiques car vis-à-vis des électrons elles jouent le même rôle que les lentilles optiques vis-à-vis des photons.

Le faisceau passe ensuite entre les plaques de déviation verticales et horizontales qui provoquent sa déflexion. Lorsque la différence de potentiel appliquée sur chaque paire de plaques est nulle, le spot se forme au centre de l'écran fluorescent.

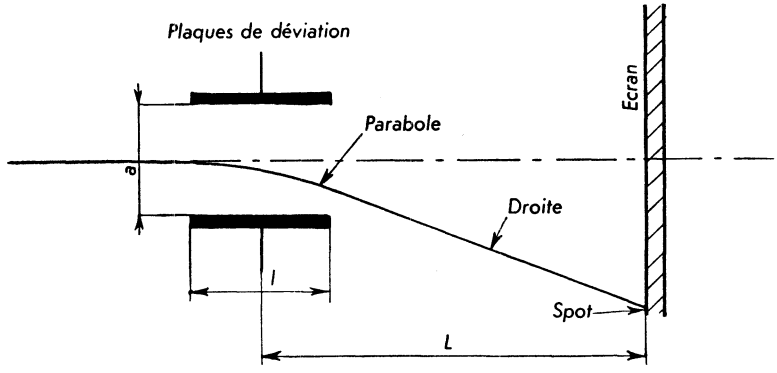


Fig. 1-51. — Action des plaques de déviation.

La déviation électrique (fig. 1-51) pour un oscilloscope donné ne dépend que du rapport de la tension de déviation V à la tension d'accélération U (1). Elle est donnée par la formule :

$$d = \frac{l \cdot L}{2\,a} \cdot \frac{V}{U}.$$

2° Description (fig. 1-52).

a) Cathodes.

Ce sont des cathodes à oxydes à chauffage indirect. Les oxydes sont déposés sur le fond du tube en nickel.

Le filament ne diffère pas de celui des tubes à vide ordinaires.

b) Electrode de contrôle ou de modulation (wehnelt).

Elle possède un trou circulaire qui focalise le faisceau d'électrons émis par la cathode. La forme du wehnelt entourant complètement la cathode a pour but d'éviter le retour d'ions positifs qui pourraient amener sa destruction prématurée.

(1) La déviation magnétique dont le principe sera examiné au paragraphe cinescope est employée lorsqu'on souhaite une déviation proportionnelle à un courant, la fréquence des courants de déviation étant déterminée une fois pour toutes (télévision, radar).

Le wehnelt ainsi que les autres électrodes qui constituent le canon électronique sont en nickel.

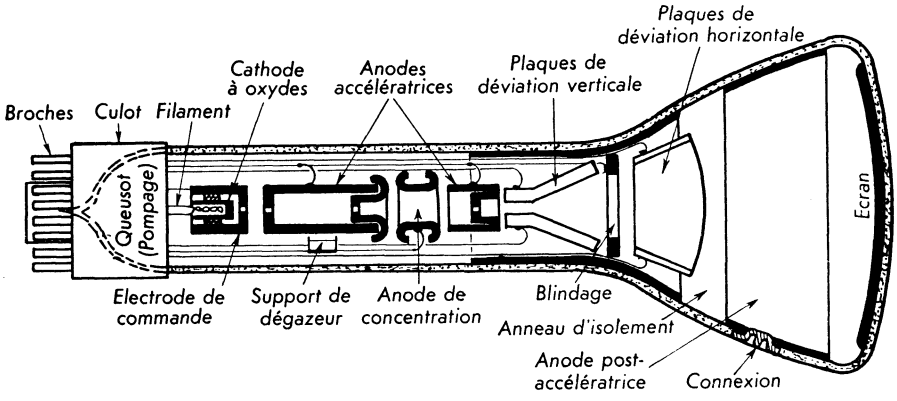


Fig. 1-52. — Oscilloscope cathodique.

c) Anodes accélératrices.

Les oscilloscopes comportent une anode (canon triode) ou deux anodes accélératrices (canon tétrode) réunies entre elles. Leur forte tension positive permet d'augmenter la vitesse des électrons ce qui évite l'étalement du faisceau. Les défauts de forme sont supprimés par passage à travers les petits trous circulaires des diaphragmes.

d) Anode de concentration.

C'est un cylindre en nickel dont le rôle principal est la concentration du faisceau par action des lignes de forces électriques. Cette électrode ainsi que les anodes accélératrices ont des bords arrondis pour éviter la formation d'effluves par suite des potentiels élevés auxquels elles sont soumises. Cette particularité n'a pas lieu d'être lorsque l'ensemble de ces électrodes forme un blindage compact comme sur la figure 1-53.

e) Plaques de déviation.

Le système comporte deux paires de plaques en nickel, l'une pour la déviation verticale, l'autre pour la déviation horizontale. Elles doivent être rigides ce qui s'obtient par pliage des bords et fixation soignée. Leurs symétrie doit être parfaite afin d'éviter la distorsion en trapèze. Elles sont parallèles dans leur première partie puis divergentes après pour éviter l'interception du faisceau lorsqu'il est fortement dévié.

La sensibilité de déviation s'exprime en volts par centimètre.

f) Anode post-accélératrice.

On l'utilise sur les tubes de grand diamètre.

La déviation d'un faisceau électronique est d'autant plus difficile à obtenir que la vitesse des électrons est grande du fait de leur inertie. Pour faciliter la déviation on n'accélère que moyennement le faisceau avant.

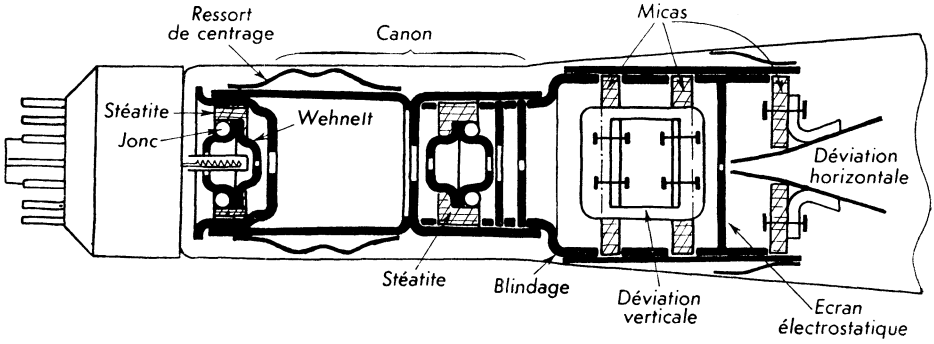


Fig. 1-53. — Oscilloscope cathodique.

Après déviation on accélère de nouveau au moyen d'une anode post-accélératrice sous une forte tension (2 000 à 20 000 V) constituée par une couche de graphique colloïdal (aquadag) déposée sur la paroi interne de l'ampoule. Ce revêtement déposé sur le cône continue vers le canon avec une séparation appelée anneau d'isolement. La connexion se fait sur une corne de l'ampoule avec une prise à pince comportant un capuchon isolant (fig. 1-54). Les avantages procurés par l'anode post-accélératrice sont :

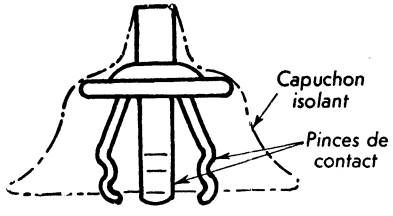


Fig. 1-54.
Prise d'anode post-accélératrice.

— augmentation de la luminosité ;
— absorption par la couche conductrice des électrons vagabonds qui viennent frapper l'ampoule ;
— écoulement des charges apportées par le faisceau électronique sur l'écran fluorescent ;
— évite la lumière extérieure de frapper l'écran sur l'arrière ainsi que les réflexions lumineuses parasites sur l'écran.

Par contre l'emploi de très haute tension diminue la sensibilité et certains constructeurs ont réussis à y remédier en utilisant une anode post-accélératrice hélicoïdale (Philips) assurant une répartition progressive du potentiel, ou en appliquant la tension post-accélératrice entre l'écran métallisé et une

grille fine transparente aux électrons (CSF). Dans ce deuxième procédé la déviation n'est pas perturbée par la post-accélération et le champ uniforme ne provoque pas de déformation géométrique de l'image.

g) Ecran.

Le choc des électrons sur la substance fluorescente provoque l'émission de rayonnements électromagnétiques dont le spectre varie avec la substance et qui s'étend des rayons X mous aux longueurs d'ondes rouges de la lumière visible.

Sur les nouveaux tubes l'écran est aluminisé.

L'épaisseur d'aluminium est inférieur de 30 % à celle utilisée sur les cinescopes permettant ainsi aux électrons de la traverser pour des valeurs de THT comprises entre 3 et 6 kV.

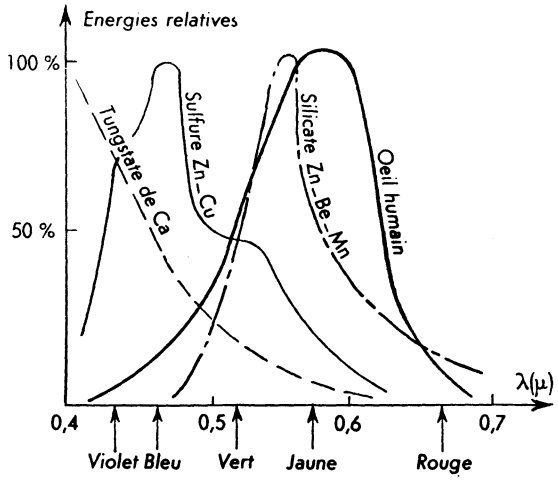


Fig. 1-55. — Sensibilités d'écrans.

Le tableau suivant donne les caractéristiques des principales substances utilisées pour les écrans.

Leur couleur correspond à celle de la dominante du spectre, celui-ci pouvant être plus ou moins étendu (exemples fig. 1-55).

La persistance ou rémanence se chiffre en pourcentage (1 % ou 0,1 %) de luminance qui subsiste après un certain temps. Exemples de persistance :

— Tubes pour enregistrement photographique : courte.
— Tubes de mesure ou de télévision : moyenne.
— Tubes pour radar : longue.

Il subsiste 1 % de la luminance maximale après 0,05 seconde pour les tubes de mesure les plus utilisés ou les tubes de télévision en noir et blanc.

h) Supports d'électrodes.

Pour maintenir l'alignement et la rigidité des électrodes on utilise :

— des baguettes de verre dans lesquelles sont piquées à chaud des tiges de ferro-chrome soudées aux divers éléments du canon (fig. 1-56) ;

TABLEAU 1-6. — SUBSTANCES POUR ÉCRANS

Base	Activateur	Couleur	Persistance	λ max du spectre	Rendement lumineux candéla/watt	Applications	Code A	Code E
Sulfure de zinc	Ag	bleue	courte	4 580 Å	2,2	Photographie : Télévision couleurs	P 11	B
Sulfure de zinc et sulfure de cadmium	Cu	orange	très longue	6 250 Å	1,5	Phosphorescence : tubes pour radar	P 12	F
Orthosilicate de zinc (calamine)	Mn	verte	longue	5 250 Å	9	Très utilisé		N
Silicate de zinc (willemite)	Mn	verte	moyenne	5 230 Å	9	Tubes de mesures : très utilisé	P 1	G
Sulfure de zinc sur sulfure de zinc et cadmium	Ag + Cu	bleue suivie vert-jaune	courte très longue	4 400 Å	2,4	Tubes à 2 couches pour radar et mesures haute persistance	P 7	P
Sulfure de zinc	Cu	vert-jaune	longue	5 000 Å	2	Ecrans de jour longue persistance		R
Sulfure de zinc plus silicate double de zinc et béryllium ..	Mn	blanche	brève	4 500 Å	2,5	Télévision noir et blanc	P 4	W
Borate de cadmium ..	Mn	rouge	longue	6 500 Å	1	Insensible aux U.V. observations aériennes de nuit	P 13	
Tungstate de cadmium	Cu	bl.-bleuté	courte	4 900 Å	0,3	Sensible aux U.V.		

Code A : américain Code E : européen

— des baguettes de céramique sur lesquelles les tiges sont fixées par un émail ;

— des rondelles de céramique ou de mica immobilisées dans un blindage général (fig. 1-53).

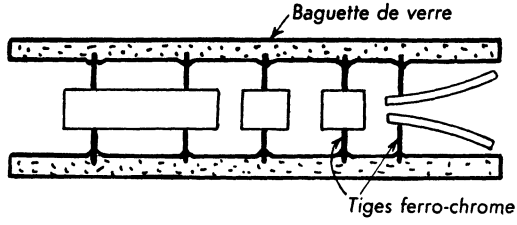


Fig. 1-56. — Fixation des électrodes.

Le centrage de l'ensemble dans le col est réalisé par des lamelles élastiques.

i) Enveloppe.

Il existe deux types de fond :

— fond bombé circulaire ;

— fond plat circulaire : moins résistant et de fabrication plus difficile.

Les diamètres les plus utilisés sont 7, 10, 13 cm pour les appareils de mesure, 22, 31, 41 cm pour les tubes radar.

Le cône du tube peut être recouvert extérieurement d'un enduit conducteur en graphite colloïdal relié à la masse qui sert de condensateur de filtrage de la THT — (C = 2 000 pF environ).

Les principaux culots utilisés sont les suivants : magnal (11 broches), duodécal (12 broches), diheptal (14 broches), octal (8 broches). Les oscilloscopes étant très sensibles aux champs magnétiques il est presque toujours indispensable de les placer dans un écran magnétique à grande perméabilité (Mumétal).

3° Fabrication.

L'ampoule en verre peut être soufflée dans le cas de petits tubes à fond bombé ou par soudure verre-verre des trois parties : col, cône et fond pour les tubes à fond plat.

La couche fluorescente est déposée par sédimentation. Le liquide (eau bi-distillée) contenant la poudre remplit le fond de l'ampoule. Elle se dépose sur le verre avec du silicate de potasse qui provoque son adhérence. L'opération est délicate. Pour obtenir une épaisseur constante elle doit se faire à température constante et être rigoureusement exempte de vibrations. La métallisation effectuée sur certains tubes sera étudiée au paragraphe cinescopes.

Le pompage, la fermeture et la vaporisation du dégazeur s'effectuent comme pour les tubes à vide ordinaires.

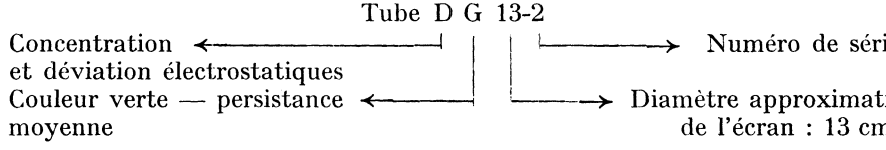
4° Code.

Le code européen utilisé pour la désignation des tubes cathodiques est résumé dans le tableau suivant.

TABLEAU 1-7. — CODE DES TUBES CATHODIQUES

1re lettre	2e lettre	1er nombre	2e nombre
Types de concentration et déviation	Couleur et persistance	Dimensions en cm	
A : concentration électrostatique déviation magnétique D : concentration et déviation électrostatiques M : concentration et déviation magnétiques	B bleu, courte C bleu-violet, très courte F orange, très longue G verte, moyenne H bleu-vert, longue K bleu-vert, très courte L orange, longue P écran à 2 couches bleue, courte plus vert-jaune, longue R vert-jaune, longue W blanche, moyenne	Diamètre de l'écran pour tubes circulaires Diagonale de l'écran pour tubes rectangulaires	Numéro de série

Exemple :



C - Cinescopes.

1° Généralités.

Les cinescopes (1) (kinescopes, cathoscopes, tubes image) sont des tubes cathodiques traduisant en image sur un écran luminescent les signaux électriques de télévision.

(1) Le terme cinescope est normalisé : vocabulaire électrotechnique C 01-007.

Nous nous bornerons à étudier ici les détails de fonctionnement ou de construction différents de ceux examinés pour les oscilloscopes.

La principale différence réside dans l'utilisation de la déviation électromagnétique pour les raisons suivantes :

— possibilité d'obtenir plus facilement une grande déviation du faisceau,
— longueur environ 5 fois plus faible qu'un tube à déviation électrostatique de même diamètre,
— sensibilité plus grande de la déviation électromagnétique pour une même tension accélératrice,
— la déviation électromagnétique ne s'accompagne pratiquement pas de distorsion,
— construction interne plus simple.

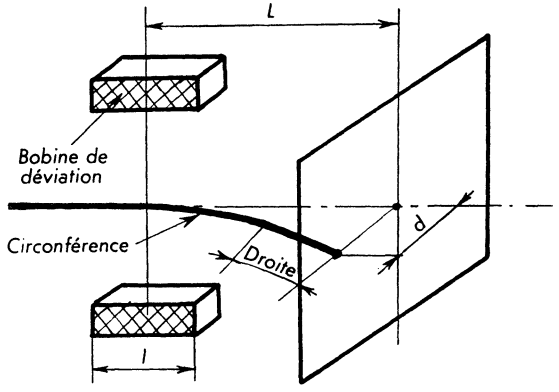


Fig. 1-57. — Déviation magnétique.

La déviation magnétique se fait dans un plan perpendiculaire à la direction du champ (fig. 1-57). Elle est donnée par la formule :

$$d = H \sqrt{\frac{e}{2\,m\,U}} \cdot L\,l$$

e : charge de l'électron
m : masse de l'électron
l. L, d : voir figure
H : champ magnétique
U : tension d'accélération

Dans le système *S.I.* on a
$e/m = 1{,}76.10^{11}$ C/kg
l, L, d en mètre
H en A/m
U en volts

2° Description.

a) Piège à ions.

C'est un dispositif spécial destiné à supprimer la tache ionique en déviant les ions en dehors du faisceau. La tache ionique est une tache sombre qui

apparaît au centre de l'écran après un certain temps de fonctionnement et qui est due à la destruction de la substance fluorescente par les ions négatifs qui se produisent dans le tube.

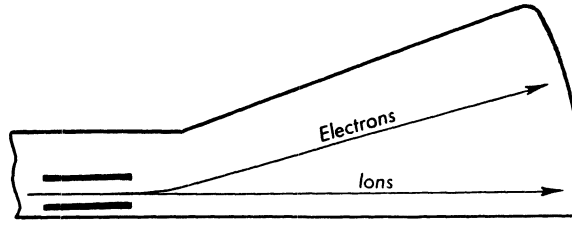


Fig. 1-58. — Axe de canon oblique.

Ce phénomène est particulier aux tubes à déviation magnétique et accentué par les fortes tensions d'accélération (supérieures à 8 000 V) nécessaires à l'obtention d'un spot très fin.

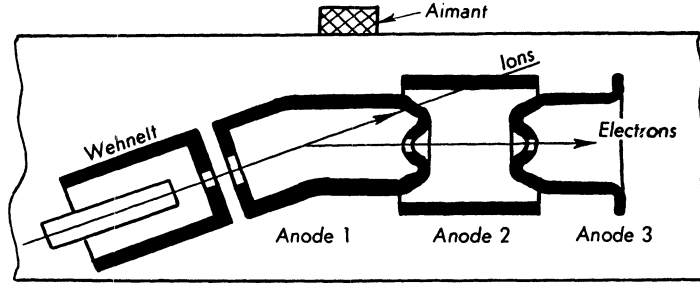


Fig. 1-59. — Canon coudé.

Les ions négatifs sont formés par fixation d'électrons sur les atomes de gaz résiduels ou occlus tels que l'oxygène ou le chlore, au voisinage de la cathode. La déviation magnétique étant inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse de la particule les ions seront beaucoup moins déviés que les électrons et ils viennent frapper le centre de l'écran (1).

Pour supprimer cet inconvénient on utilise des pièges à ions.

Les différentes solutions ayant été envisagées sont les suivantes :

— *Axe du canon oblique* par rapport à l'écran (fig. 1-58) soit avec une ampoule dont le cône est désaxé par rapport au col (construction délicate), soit avec le canon placé obliquement dans le col. Ces solutions sont peu utilisées à cause soit de la difficulté de construction, soit de l'encombrement ou des défauts de forme du spot.

(1) Les ions sont déviés de la même façon que les électrons dans les tubes à déviation électrostatique.

— *Canon coudé* (fig. 1-59). Le faisceau d'électrons est redressé du coude par un champ magnétique de 4 000 A/m environ obtenu avec un petit

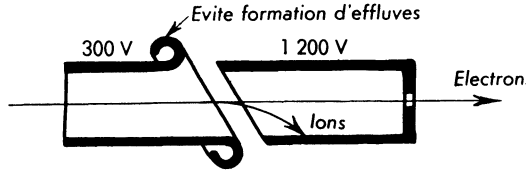


Fig. 1-60. — Anode en sifflet.

aimant permanent muni de pièces polaires (fig. 1-61 et 1-62). Les ions négatifs étant moins déviés vont frapper une région où ils ne peuvent nuire. Ce dispositif constitue un vrai spectrographe de masse qui trie les particules de masses différentes.

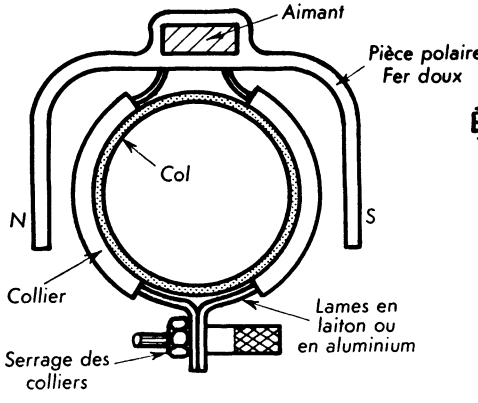


Fig. 1-61

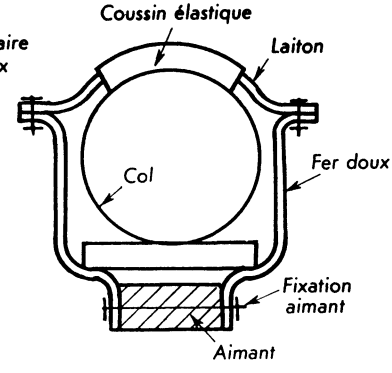


Fig. 1-62.

Aimants de pièges à ions.

— *Anode coupée en sifflet* (fig. 1-60). L'anode 2 étant portée à un potentiel plus élevé que l'anode 1, il en résulte un champ électrostatique à l'endroit de la coupure qui courbe les trajectoires. Les ions viennent frapper la paroi interne de la deuxième anode alors que les électrons sont redressés dans l'axe par un champ magnétique au moyen d'un aimant permanent comme ci-dessus.

— *Remarque.* La métallisation des écrans étudiée au paragraphe **(d)** a permis la suppression des pièges à ions sur les tubes récents.

b) Concentration.

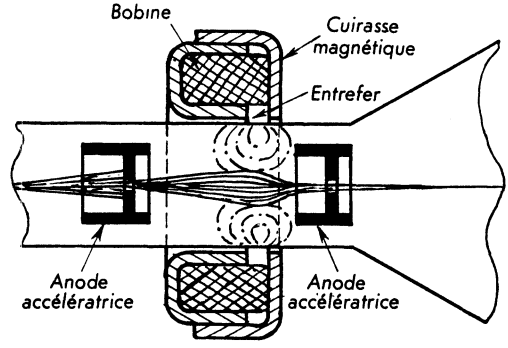
— *Concentration électrostatique.*

C'est la méthode utilisée sur les oscilloscopes. On l'emploie aussi sur les cinescopes à cause de son prix de revient peu élevé et de son faible encombrement.

— *Concentration magnétique.*

Elle permet d'obtenir plus facilement des faisceaux très fins transportant de grandes densités de courant.

La première solution consiste à utiliser une « lentille magnétique » (fig. 1-63). Elle est entourée d'une cuirasse magnétique en fer doux évitant la dispersion des lignes de force et permettant de localiser l'entrefer à l'endroit désiré. L'entrefer est décalé de façon à ce que la bobine de concentration soit le plus éloigné possible des bobines de déviation.



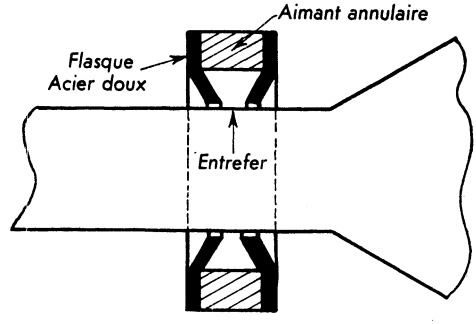


Fig. 1-63 et Fig. 1-64.
Concentration magnétique.

La deuxième solution utilise un aimant permanent (fig. 1-64). Elle est préférable car moins onéreuse (économie de cuivre et d'énergie électrique). La stabilité est meilleure.

Le réglage de la concentration peut s'effectuer :

— soit par déplacement de la lentille sur le col,

— soit par variation de l'intensité dans le cas d'emploi d'une bobine,

— soit par un shunt magnétique dans le cas d'un aimant permanent. L'aimant travaillant presque à circuit ouvert il faut utiliser des alliages

à grande coercitivité (Alcomax II, Hycomax) ou mieux des ferrites durs. Le réglage de concentration se fait en vissant plus ou moins un noyau de fer doux à l'intérieur de l'aimant (fig. 1-65 et 1-66), ou en écartant plus ou moins deux aimants annulaires au moyen d'un bouton de réglage fileté.

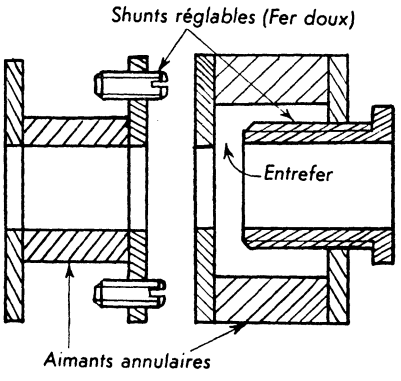


Fig. 1-65 et Fig. 1-66.
Réglage de la concentration.

c) Cadrage.

La lentille magnétique étant extérieure au tube il est possible d'utiliser sa rotation autour de l'axe de symétrie horizontal (ou vertical) pour le cadrage de l'image.

Dans le cas de concentration électrostatique on utilise :

— le *cadrage magnétique* réalisé avec deux aimants annulaires mobiles l'un par rapport à l'autre et montés en opposition magnétique à une dizaine de millimètres derrière le bloc déflecteur.

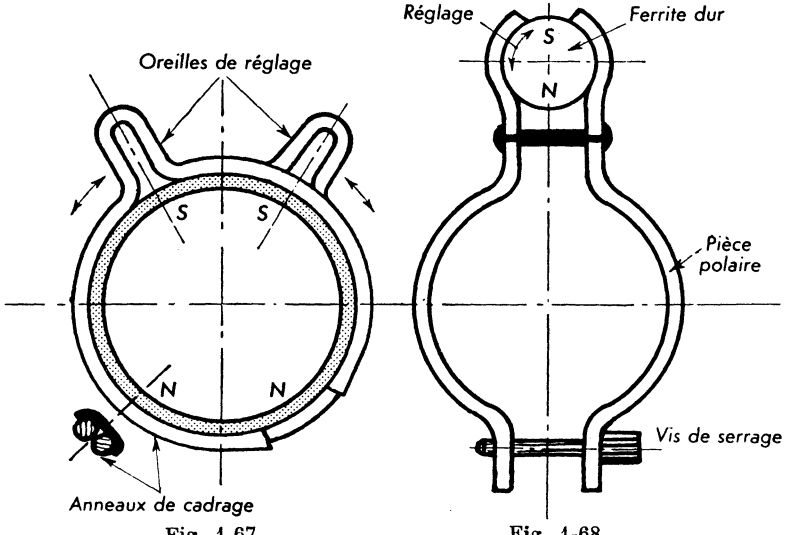


Fig. 1-67 Fig. 1-68.
Cadrage magnétique.

Les aimants sont en ferrite dur ou mieux en " plastoferroxdur " (mélange de ferrite dur et de résine thermodurcissable) permettant une augmentation de l'efficacite du balayage de 5 à 10 %. Le système peut comporter un petit aimant en ferrite monté sur une lamelle déformable permettant de corriger les déformations géométriques de l'image dues au cadrage (fig. 1-67).

Un autre procédé utilise un aimant cylindrique en ferrite dur aimanté transversalement monté sur une fourche enserrant le col du tube. Le cadrage est obtenu par rotation de la fourche autour du col. La rotation de l'aimant autour de son axe permet de régler l'intensité de la déviation (fig. 1-68).

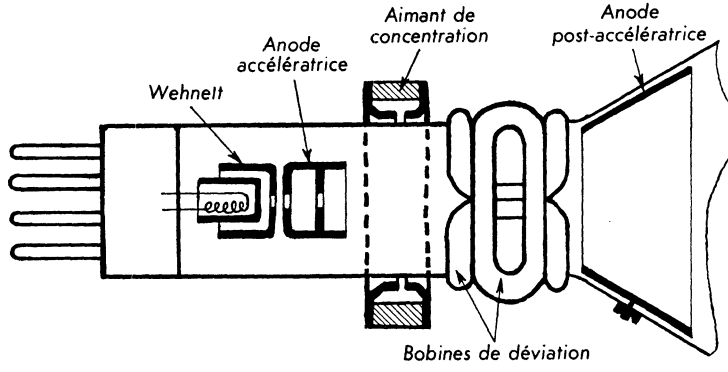


Fig. 1-69. — Cinescope.

d) Déviation magnétique.

Elle est réalisée au moyen de 2 paires de bobines à axes perpendiculaires placées à l'extérieur du tube (fig. 1-69). L'ensemble fixé par collier autour du col constitue le bloc de déviation.

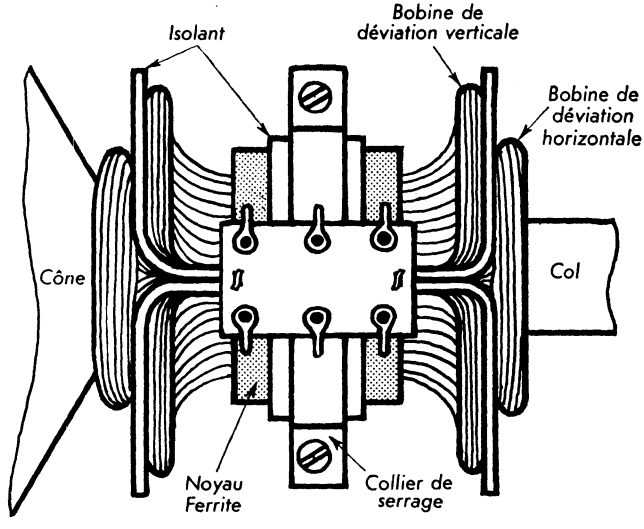


Fig. 1-70. — Bloc déflecteur.

Pour obtenir une image rectangulaire la réalisation doit être très soignée. Elle nécessite d'avoir les bobines de chaque paire identiques, rigoureusement

parallèles et alignées dans le plan perpendiculaire à l'axe du tube. Les flux de chaque paire doivent être homogènes et perpendiculaires entre eux.

La forme et la disposition du bloc de déviation sont données à la figure 1-70.

La diminution du diamètre du col sur les tubes 110° permet de compenser en partie l'augmentation de puissance nécessaire à la déviation.

Les noyaux en ferrite pour bobines de déflexion seront examinés au chapitre IV : Bobinages H.F.

e) Ecrans.

La couche fluorescente a la particularité d'être « aluminisée » sur les tubes modernes, c'est-à-dire revêtue intérieurement d'une mince couche d'aluminium (0,1 à 0,5 μ) déposée par évaporation. Ce perfectionnement procure les avantages suivants :

— Réflexion de la lumière émise vers l'arrière sur l'avant améliorant ainsi la brillance et le contraste de l'image.

— Egalisation du potentiel de la couche fluorescente éliminant les charges statiques locales.

— Protection de la couche fluorescente contre le bombardement des ions négatifs plus lents que les électrons et arrêtés par la couche d'aluminium. Le piège à ions est supprimé sur les tubes récents.

L'obtention d'un miroir parfait (fig. 1-71) nécessite l'obturation préalable des creux de la substance fluorescente par du collodion. L'aluminium est vaporisé sous vide à chaud.

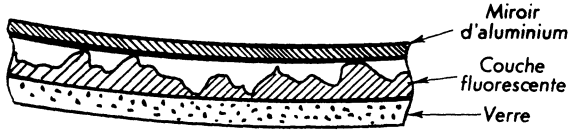


Fig. 1-71. — Ecran aluminisé.

L'étuvage permet ensuite d'éliminer la pellicule de collodion qui s'oxyde et le miroir se recouvre d'alumine.

f) Ampoules.

Fond rectangulaire : Caractérisé par la diagonale (36, 43, 49, 54, 59, 70 cm). Les dimensions sont fonction de l'angle d'ouverture du faisceau dans le plan de la diagonale. Cet angle est de 70°, 90°, 110° et même 114°. Le grand angle de 110° a été possible grâce à l'amélioration de la technique de déviation qui a permis aussi l'apparition des ampoules « à coins carrés » donnant une image moins déformée dans les angles.

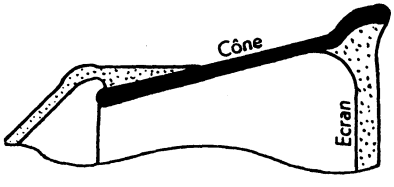


Fig. 1-72. — Cône en acier.

Un tube 110° a une longueur inférieure de 18 cm environ par rapport à un tube 90° de même diagonale. Par contre il nécessite une puissance de déviation de 10 à 20 % supérieure.

La figure 1-73 montre l'évolution de la forme compte tenu de l'angle d'ouverture.

Le poids de l'ampoule varie de 80 à 150 newtons suivant les modèles.

Les ampoules sont « tout verre » ou « métal-verre » pour réduire la quantité de verre spécial utilisé. Dans ce cas le cône est en acier inoxydable et il constitue l'anode post-accélératrice. Etant porté à la T.H.T. il y a lieu de l'isoler soigneusement. Ils sont plus légers que les tubes tout verre. Le verre dur (borosilicaté du type Pyrex) qui constitue le col et l'écran est soudé au cône (fig. 1-72).

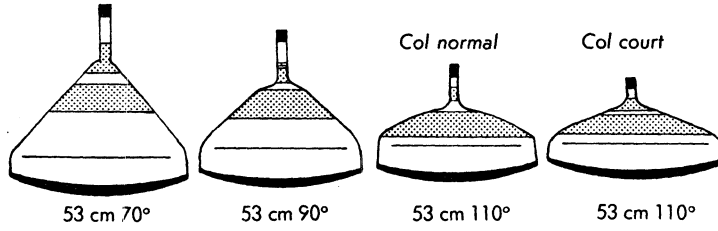


Fig. 1-73. — Evolution des cinescopes.

Fond circulaire : Diamètres 64,8 à 409,5 mm. Ils sont utilisés sur radars ou pour la télévision industrielle.

Précautions d'emploi : Il faut éviter les chocs ou rayures qui pourraient provoquer l'implosion. En particulier, il ne faut jamais prendre le tube par le col. Sa fixation, ainsi que les connexions doivent être souples pour éviter les contraintes mécaniques pouvant provoquer une fêlure.

g) Filtre.

Le contraste de l'image peut être amélioré en plaçant devant l'écran un filtre teinté en gris qui sert de protecteur. Il affaiblit aussi la réflexion de la lumière ambiante sur l'écran. La diminution d'intensité lumineuse doit être compensée par le réglage de brillance.

Un autre procédé plus récent pour améliorer le contraste consiste à teinter le verre de l'écran dans la masse. D'autre part un enrobage extérieur fibre de verre polyester évite l'emploi d'un écran de protection séparé.

h) Tubes pour télévision en couleurs.

Le système le plus utilisé actuellement aux U.S.A. consiste en un tube comportant 3 canons qui sont chargés de transmettre les 3 faisceaux correspondant aux 3 couleurs fondamentales du spectre. Chaque faisceau après avoir traversé l'un des trous d'un cache métallique (comportant 200 000 trous) vient frapper l'une des 3 substances luminescentes de l'écran alternativement rouge, verte et bleue.

En France la télévision en couleur n'est encore utilisée que pour certaines applications industrielles.

D - Indicateurs cathodiques.

1° Généralités.

Un indicateur cathodique est une forme élémentaire de tube cathodique utilisé pour indiquer une variation de tension.

Ces tubes permettent d'accorder exactement un récepteur sur la fréquence de l'émetteur choisi. On les appelle aussi indicateur visuel d'accord ou « œil magique ».

On a utilisé avant la mise au point des nombreux indicateurs cathodiques actuels des « indicateurs au néon » constitués comme celui de la figure 1-87. Ces tubes commandés par un tube à pente réglable s'illuminent sur une longueur plus ou moins grande suivant l'acuité de l'accord.

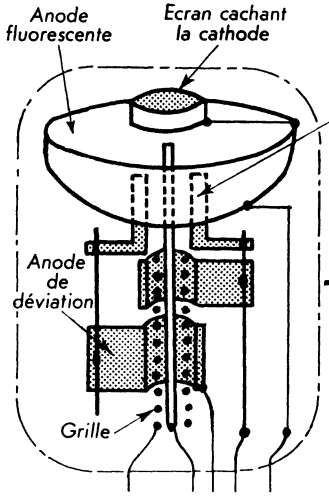


Fig. 1-74

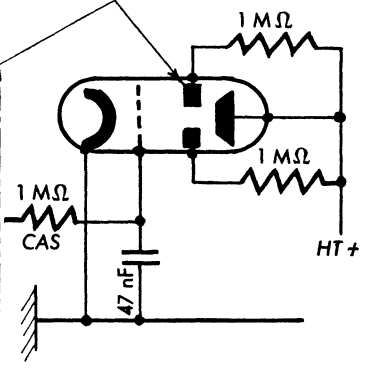


Fig. 1-75.

Indicateur cathodique.

2° Description d'un indicateur à une sensibilité.

Le schéma de principe est représenté à la figure 1-75 et la disposition des électrodes sur la figure 1-74. L'indicateur comprend un élément amplificateur (triode) qui augmente la sensibilité, des électrodes de déviation et un écran fluorescent donnant une lumière verte (sulfure ou silicate de zinc).

La tension de commande (composante continue négative de la tension détectée) appliquée à la grille de l'élément triode est maximale lorsque le réglage est obtenu. Le courant I_a est alors minimum et la chute de tension dans la résistance est minimale. La plaque déviatrice mise à ce potentiel est alors beaucoup moins négative qu'au désaccord par rapport à l'écran qui est relié directement à la H.T. +.

Les électrons émis par la cathode sont faiblement déviés par la plaque déviatrice et le secteur sombre est minimum sur l'écran (fig. 1-77). Au désaccord le secteur sombre s'élargit (fig. 1-76). Si la disposition des électrodes diffère de celle des tubes de réception ordinaires, les matériaux utilisés et la construction sont analogues.

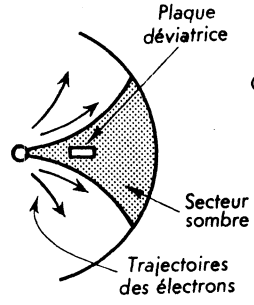


Fig. 1-76

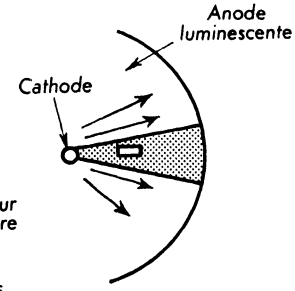


Fig. 1-77.

Action d'une plaque déviatrice.

3° Différents modèles.

a) Indicateur à une sensibilité écran circulaire (type EM 1).

Comporte une seule plaque déviatrice, fig. 1-78.

b) Indicateur à deux sensibilités, écran circulaire (trèfle cathodique).

Avec 2 plaques déviatrices (type EM 3) fig. 1-79.
Avec 4 plaques déviatrices (type EM 34) fig. 1-80 et 1-81.
Ils comportent deux éléments triodes, fig. 1-74.

Les anodes sont distinctes, de longueurs différentes donnant deux pentes différentes. Elles sont reliées aux deux paires de plaques déviatrices dont l'une donne le maximum de déviation pour quelques volts (stations faibles) et l'autre pour une tension plus grande (stations puissantes).

c) Indicateur à une sensibilité, écran ovale (type EM 85) fig. 1-82.

La disposition des électrodes est différente mais le fonctionnement est identique aux modèles précédents.

d) Indicateur à une sensibilité, écran rectangulaire (type EM 84) fig. 1-83 — (ruban magique).

La zone d'ombre centrale se rétrécit à l'accord. Le principe de fonctionnement est le même que celui des modèles précédents.

e) Indicateur subminiature (type DM 70) fig. 1-86.

La constitution est plus simple que celle des modèles précédents. C'est une triode à chauffage direct utilisée de préférence sur les récepteurs alimentés sur piles (chauffage 1,4 V sous 0,025 A).

La grille est constituée par une plaque métallique dans laquelle on a pratiqué une ouverture en forme de point d'exclamation. Le faisceau d'électron passant à travers l'ouverture de la grille vient frapper l'anode fluorescente (fig. 1-85).

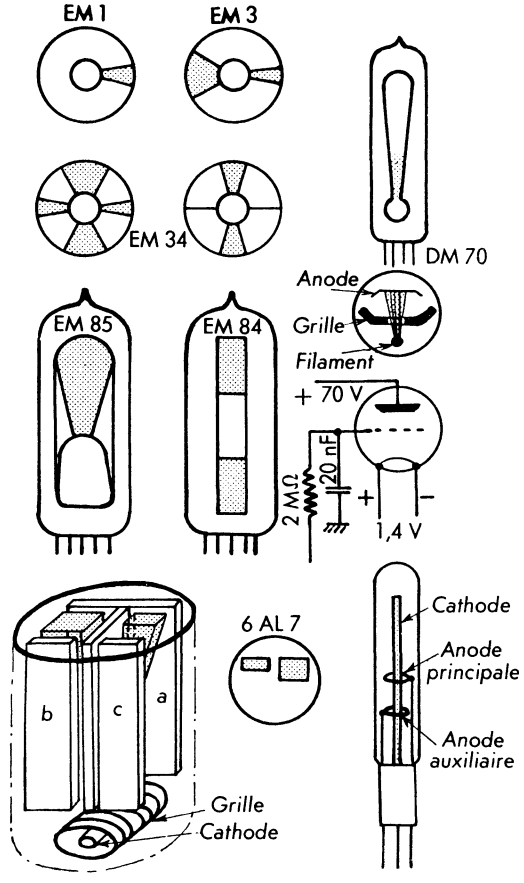


Fig. 1-78 à 1-89.

A l'accord la grille devient plus négative le faisceau est plus resserré et le secteur fluorescent diminue (fig. 1-84).

L'ampoule est revêtue intérieurement d'une substance conductrice transparente pour éviter l'action perturbatrice des champs électriques extérieurs.

f) Indicateur pour modulation de fréquence (balance magique) (type 6 AL 7) fig. 1-89.

Le tube comporte un filament, une cathode, une grille qui contrôle le flux électronique, trois électrodes de déflexion et un écran transparent

revêtu d'une substance conductrice translucide recouverte d'une matière fluorescente. Ces électrodes sont disposées comme indiqué sur la figure 1-88. Lorsqu'il y a désaccord de fréquence, les deux parties du faisceau séparées par un écran sont inégalement déviées par les déflecteurs b et c portés à des tensions négatives différentes. A l'accord on obtient deux rectangles luminescents égaux et de largeur minimale.

E - Tubes compteurs décimaux.

1° Description.

Le principe d'un tube compteur décimal est donné à la figure 1-89. Le faisceau électronique émis par la cathode est concentré, accéléré, puis dévié

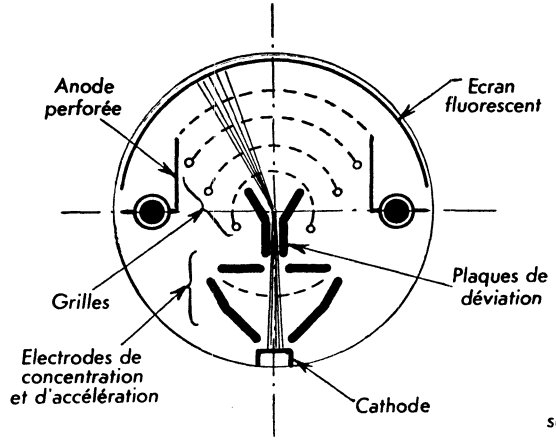


Fig. 1-89

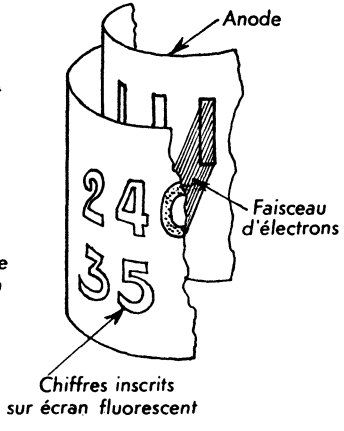


Fig. 1-90.

Tube compteur décimal.

au moyen de plaques de déviation. Le faisceau passe à travers l'anode perforée après avoir traversé un système de grilles. Il vient frapper l'écran fluorescent sur lequel sont inscrits les chiffres de 0 à 9 (fig. 1-90).

2° Utilisations.

Le tube décrit ci-dessus est étudié pour le comptage des impulsions électriques. Un premier tube indique les unités, un second les dizaines, un troisième les centaines et ainsi de suite. Les impulsions successives font dévier horizontalement le faisceau et les chiffres 1, 2, 3... s'éclairent successivement. La dixième impulsion appliquée à l'un des tubes déclenche le tube de la tranche numérique suivante par l'intermédiaire d'un montage électronique.

Le tube E 1 T (culot duodécal) permet le comptage d'impulsions à des vitesses atteignant 100 000 par seconde.

Le « trochotron » E T 51 (culot spécial à 27 broches) permet d'obtenir une fréquence de comptage de 1 MHz maximale.

Le tube indicateur Z 520 M permet l'affichage d'un seul chiffre (0 à 9).

V. TUBES HYPERFRÉQUENCES.
ou tubes micro-ondes

A - Généralités.

Les fréquences élevées dites hyperfréquences ont un spectre qui s'étend approximativement de 300 MHz à 30 000 MHz (ondes décimétriques et centimétriques).

L'emploi des tubes ordinaires en hyperfréquences est limité à cause des valeurs trop élevées :

— des pertes en haute fréquence,
— de l'inductance des conducteurs,
— du temps de transit des électrons (1).

La solution de ces problèmes a été obtenue par la fabrication de triodes spéciales pouvant fonctionner jusqu'à 4 000 MHz et par la mise au point de tubes spéciaux à modulation de vitesse pour les fréquences supérieures.

B - Triodes pour très hautes fréquences.

1° Améliorations techniques.

a) Diminution des pertes en H.F.

Elle est obtenue par l'emploi de verres à faibles pertes H.F., par la forme des ampoules qui doit éloigner le plus possible le verre des régions à champ H.F. élevé et dans le cas des fréquences les plus élevées en remplaçant le verre par la céramique.

Les courants H.F. circulant dans les conducteurs d'électrodes étant très importants il faut réduire leur résistance par les moyens suivants :

— réduction de leur longueur,
— augmentation de leur diamètre,
— argenture de leur surface.

b) Diminution de l'inductance.

L'inductance parasite des conducteurs peut être diminuée :

— par l'emploi de deux conducteurs reliant une même électrode au circuit extérieur, dans la construction de triodes de type classique,

(1) Temps de transit : intervalle de temps que met un électron pour se déplacer entre deux points déterminés.

— par la technique des disques scellés (verre-métal ou céramique-métal). Les électrodes sont planes et reliées sur tout leur pourtour à des disques métalliques servant de connexions.

c) Diminution du temps de transit.

Il doit être d'autant plus faible que la fréquence d'utilisation est plus élevée. La solution de ce problème délicat consiste à obtenir des positions nettement définies des électrodes, un excellent état de surface et une distance cathode-grille pouvant atteindre une dizaine de microns seulement. Les moyens suivants sont employés :

— Utilisation d'une structure classique avec une cathode à section rectangulaire (les oxydes déposés par badigeonnage permettant d'obtenir une surface plus lisse) ou avec une cathode à réserve (voir tome I).

— Jusqu'à 1 000 MHz, emploi de grilles cadres et d'anodes rectangulaires dans des tubes de structure classique.

Pour des fréquences plus élevées les grilles sont constituées par des nappes de fils parallèles en tungstène de 5 μ de diamètre et fortement tendus pour obtenir une planéité parfaite (technique des disques scellés).

2° Différents modèles.

a) Anciens modèles — « Tube gland » (fig. 1-91).

Ils étaient utilisés jusqu'à 500 MHz maximum.

Les électrodes étaient disposées de façon à réduire au minimum les capacités internes et l'induction mutuelle entre électrodes. Les sorties étaient réparties sur une couronne de verre servant de culot.

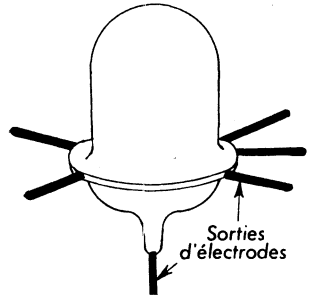


Fig. 1-91.
Tube gland.

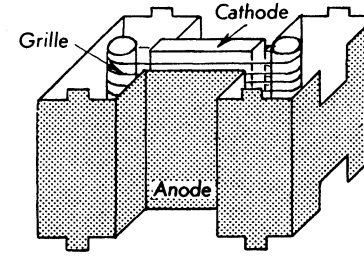


Fig. 1-92.
Triode pour ondes décimétriques.

b) Tubes à structures classiques (fig. 1-92).

Ce sont surtout des triodes munies de culots miniatures. Les électrodes sont étudiées de façon à diminuer le temps de transit comme il a été indiqué plus haut. Certaines triodes oscillatrices peuvent fonctionner jusqu'à 1 250 MHz.

c) Tubes à disques scellés.

Les tubes à scellement métal-verre appelés encore « lampes phare » sont constitués par des disques en acier argenté servant de connexions d'électrodes (fig. 1-93). Ils sont isolés entre eux par des cylindres de verre soudés aux disques. On arrive ainsi à des distances inter-électrodes de l'ordre de un dixième de mm.

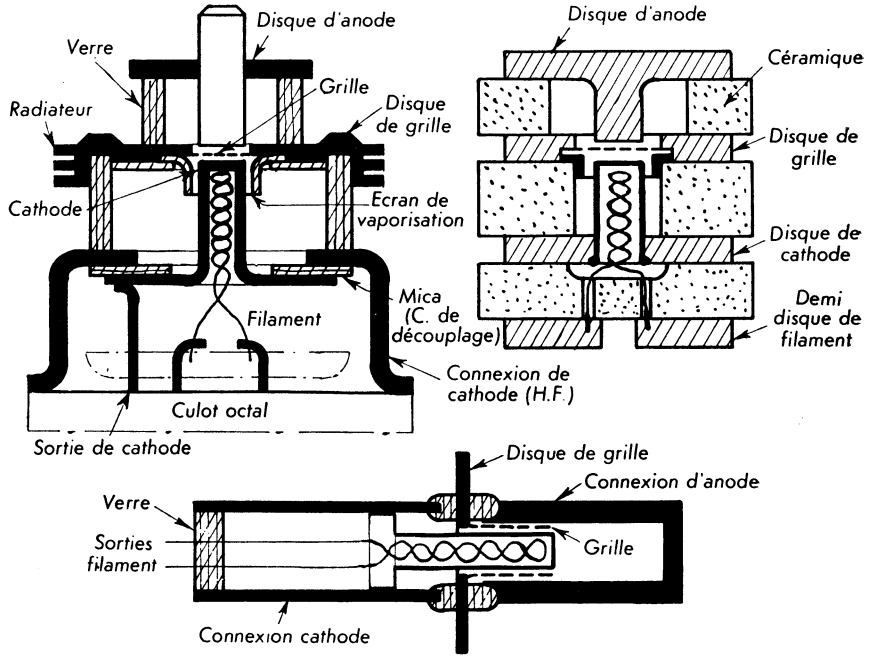


Fig. 1-93 à Fig. 1-95. — Tubes à disques scellés.

Ces intervalles entre électrodes étant difficiles à mesurer, on relève les capacités inter-électrodes et on les ajuste pendant la fabrication à leur valeur par écrasement des cylindres de verre convenablement ramollis par chauffage.

Un autre modèle (triode crayon) est représenté à la figure 1-95.

La méthode des disques scellés permet d'atteindre 4 000 MHz.

Les tubes à scellement céramique-métal d'apparition plus récente (fig. 1-94) utilisent de la forstérite à la place du verre. Ils permettent un fonctionnement en régime continu dans des conditions thermiques et mécaniques particulièrement dures. Les disques d'électrodes sont en titane. Certains modèles peuvent fonctionner jusqu'à une température d'enveloppe de 500 °C (utilisation sur engins).

C - Tubes spéciaux pour hyperfréquences.

1° Définitions.

— *Guide d'onde.* Conducteur creux de formes généralement circulaire ou rectangulaire dans lequel se propagent des ondes électromagnétiques.

— *Cavité résonnante.* Conducteur creux ne rayonnant pas à l'extérieur et pouvant produire des oscillations électriques de très haute fréquence.

— *Modulation de densité.* Variation alternative de la densité d'un faisceau électronique qui se superpose à la valeur moyenne de la densité. (Celle qui est utilisée dans les tubes électroniques à structure classique).

— *Modulation de vitesse.* Variation alternative de la vitesse instantanée imposée aux électrons d'un faisceau électronique, qui se superpose à la valeur moyenne de la vitesse des électrons.

— *Tube à modulation de vitesse* : Tube à faisceau électronique, dans lequel le flux électronique subit des variations périodiques de vitesse dont la période est comparable à la durée de parcours.

— *Tube à ondes progressives* : Tube à faisceau électronique comportant une ligne de transmission à retard et dans lequel le faisceau électronique cède de l'énergie à une onde électromagnétique dont la vitesse de propagation est très voisine de celle de la ligne de transmission.

— *Magnétron* : Tube à vide à émission thermoélectronique dans lequel le mouvement des électrons est commandé par une combinaison de charge électrique et magnétique croisés.

— *Klystron* : Tube à modulation de vitesse comportant, en principe, un résonateur d'entrée, un espace de glissement et un résonateur de sortie.

— *Résonateur d'entrée* : Cavité résonnante excitée par une source extérieure, qui produit la modulation de vitesse du faisceau électronique.

— *Résonateur de sortie* : Cavité résonnante excitée par la modulation de densité du faisceau électronique qui fournit l'énergie d'utilisation à un circuit extérieur.

— *Rhumbatron* : Résonateur en forme de tore utilisé dans les klystrons.

— *Espace de glissement* : Espace parcouru par le faisceau électronique entre les deux résonateurs et dans lequel la modulation de vitesse se transforme en modulation de densité.

— *Réflecteur* : Electrode portée à un potentiel négatif par rapport à un résonateur qui a pour but de renvoyer vers ce résonateur le faisceau électronique qui en est issu.

— *Collecteur* : Electrode qui recueille en fin de trajectoire les électrons du faisceau dont l'énergie a été utilisée en cours de trajectoire.

2° Magnétron.

a) Principe.

Les premiers magnétrons furent construits suivant le principe de la figure 1-96. Une anode pleine entoure la cathode et les électrons sont soumis

d'une part à un champ électrique radial, d'autre part à un champ magnétique axial. Les électrons décrivent des trajectoires cycloïdiques qui, suivant l'intensité du champ magnétique, coupent l'anode (trajectoire 1) ou se

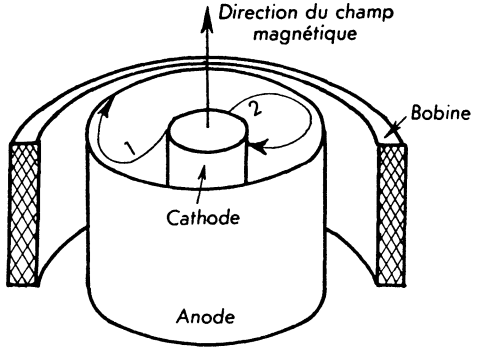


Fig. 1-96. — Magnétron : principe.

referment sur la cathode (trajectoire 2). Il existe une certaine valeur H du champ dite « intensité critique » pour laquelle les trajectoires sont tangentes à l'anode.

Un tel système peut être la source d'oscillations mais difficiles à obtenir, d'où les améliorations décrites ci-après.

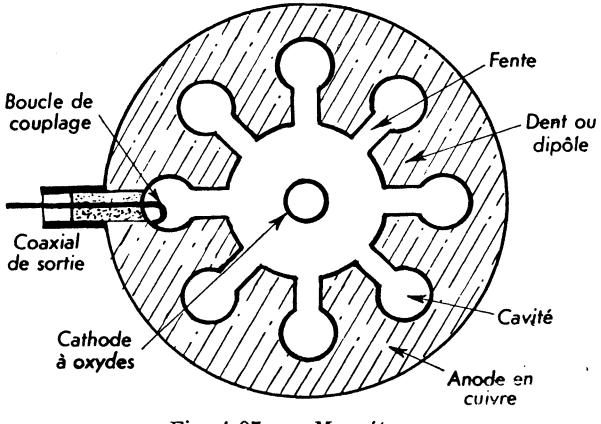


Fig. 1-97. — Magnétron.

b) Fonctionnement d'un magnétron.

Il possède un système de cavités résonnantes dont chacune d'elles communique avec la cavité centrale par une fente (fig. 1-97).

Chaque cavité peut être assimilée à un circuit oscillant (fig. 1-98). La fréquence des oscillations obtenue dépend surtout des dimensions des cavités.

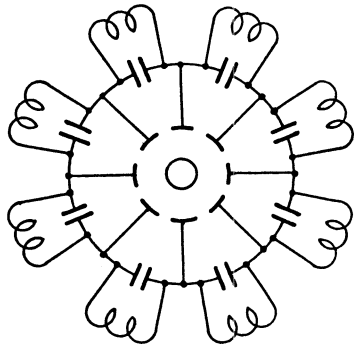


Fig. 1-98.
Magnétron, circuit équivalent.

L'anode est à la masse et la cathode alimentée en tensions négatives généralement sous forme d'impulsions. On adopte une tension d'anode inférieure à la valeur critique.

Les oscillations de très haute fréquence obtenues dans les cavités sont entretenues par l'énergie cédée par les électrons au niveau des fentes. Un certain nombre d'électrons après avoir décrit des trajectoires à plusieurs boucles viennent frapper l'anode. D'autres retournent à la cathode et l'échauffent ce qui explique que l'on puisse couper le chauffage après le démarrage.

Les oscillations sont prélevées par une boucle de couplage placée dans l'une des cavités et réunie à un coaxial.

Le système peut osciller sur un certain nombre de fréquences. On emploie généralement la plus élevée qui correspond à un déphasage de π (mode π) entre deux cavités consécutives. Pour éliminer les autres modes d'oscillations on utilise le *jumelage* (strapping) qui augmente la stabilité et le rendement. Cette méthode consiste à réunir les *dents* (ou pôles) de numéros pairs et ceux de numéros impairs ensemble par deux anneaux métalliques. Les dents sont alternativement positives et négatives au même instant ce qui correspond au mode π (fig. 1-99 et 1-100).

c) Description.

Cathode : Pour obtenir des crêtes de courant très élevées on utilise une cathode à oxydes de grandes dimensions à chauffage indirect.

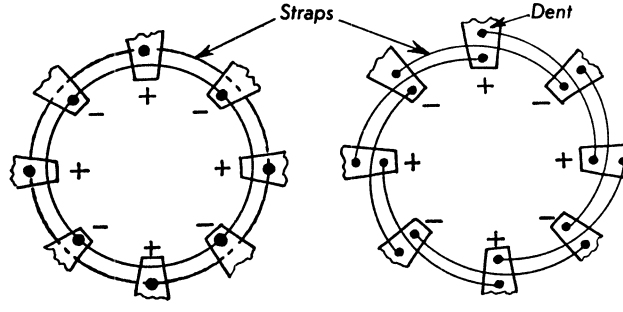


Fig. 1-99 Fig. 1-100.
Jumelage pour le mode π.

Anode : Elle est constituée par un bloc de cuivre dans lequel sont réalisées les cavités à fentes de largeur constante, triangulaires ou cylindriques

à fentes. Des cavités à fentes inégales (type soleil levant) permettent des fréquences plus élevées et facilitent la séparation des différents modes.

Le résonateur comprend un nombre pair de cavités qui varie de 6 à 18 en général.

Le jumelage (mode π) est réalisé suivant l'un des deux systèmes représentés aux figures 1-99 et 1-100.

Pour des puissances élevées l'anode comporte des ailettes de refroidissement.

Sorties : Les cosses de connexions des filaments et d'arrivée des impulsions sont fixées sur un isolant conique en verre supporté par une embase en laiton soudée au cuivre de l'anode.

La sortie H.F. se fait par un conducteur central d'un câble coaxial très court isolé sous verre et dans le vide. L'extrémité apparaît dans un guide d'onde et le conducteur central fait office de souche d'émission.

Champ magnétique : Il est créé par un aimant permanent en Alnico (ou acier à aimant similaire) fixé au tube ou directement à l'émetteur s'il est trop encombrant.

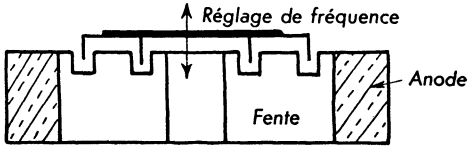


Fig. 1-101.

Magnétron à fréquence accordable.

Le réglage de fréquence peut être obtenu par variation du volume des cavités (pistons plongeurs) ou mieux par variation de la capacitance du bloc résonateur (fig. 1-101) ou des straps.

d) Limites d'emploi.

Les magnétrons fournissent des fréquences situées entre 1 000 et 25 000 MHz. La tension d'anode utilisée va de 10 000 à 30 000 V et les champs magnétiques dépassent une centaine de milliers d'A/m.

Les magnétrons sont de construction simple et robuste et conviennent parfaitement comme générateurs d'impulsions H.F. dans les radars. La puissance de crête fournie varie de quelques kW à 10 000 kW pour les gros magnétrons. Leur rendement varie de 20 à 50 %. La durée des impulsions est de quelques microsecondes. Elles sont répétées quelques milliers de fois par seconde.

Une autre application intéressante des magnétrons est la réalisation de courants de très haute fréquence destinés au chauffage par pertes diélectriques (chauffage des matières plastiques avant moulage ou collage, séchage du bois, etc.).

3° Tubes à modulation de vitesse.

a) Principe (fig. 1-102).

Un faisceau d'électrons est émis par la cathode et contrôlé par une grille. Un champ magnétique axial évite la divergence du faisceau.

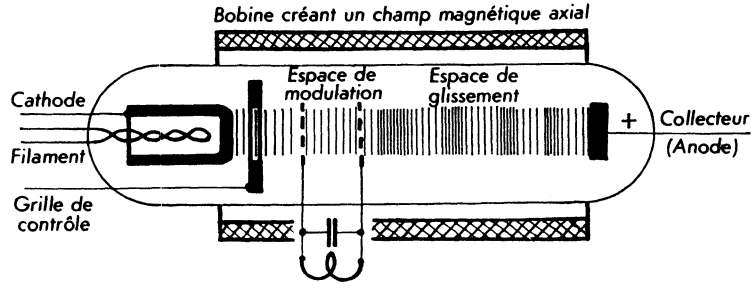


Fig. 1-102. — Tube à modulation de vitesse.

Les électrons traversent l'espace de modulation formé par deux grilles entre lesquelles est appliquée une tension oscillante. Au même instant et suivant leur position par rapport aux deux grilles certains électrons sont accélérés alors que d'autres sont retardés.

Les électrons accélérés rattrapent les électrons retardés et l'on constate un groupement, dans l'espace de glissement situé entre les grilles de modulation et le collecteur. La modulation de vitesse est ainsi transformée en modulation de densité qui se traduit par une succession de « paquets » d'électrons dont la densité augmente à mesure que l'on se rapproche de l'anode. Entre les paquets le nombre d'électrons est raréfié.

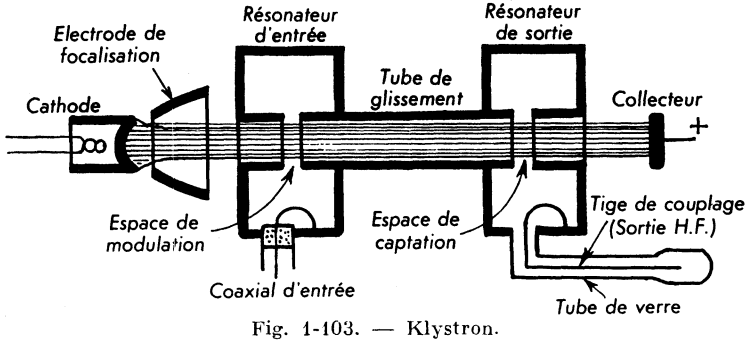


Fig. 1-103. — Klystron.

b) Fonctionnement d'un klystron (fig. 1-103).

L'espace de modulation décrit précédemment est réalisé dans un klystron par un *rhumbatron* (résonateur d'entrée). C'est une cavité résonnante en

forme de tore assimilable à un circuit oscillant dont les éléments inductance et capacité font corps l'un avec l'autre (circuit à constantes réparties).

Les avantages d'une telle cavité sont :

— Aucune perte par rayonnement car la cavité constitue un blindage efficace.

— Les pertes par effet Joule sont réduites car les parois du résonateur constituent des conducteurs de forte section.

— Le coefficient de surtension d'une cavité est très élevé (de 3 000 à 10 000).

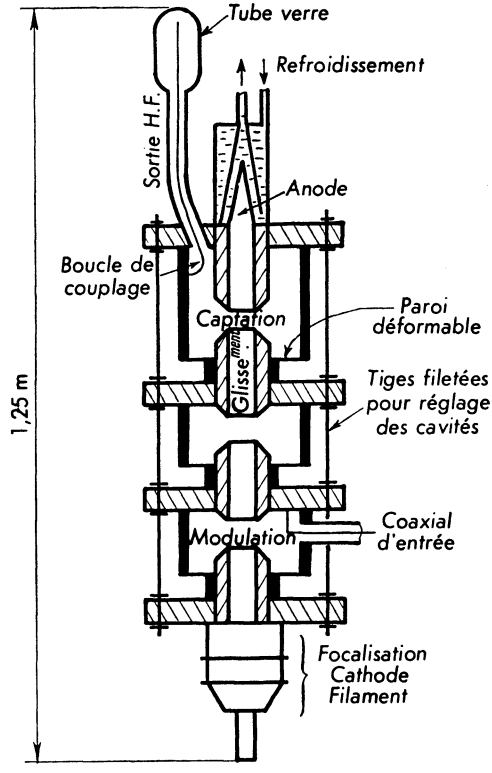


Fig. 1-103 bis. — Klystron à cavités internes 15 kW à 600 MHz.

Le faisceau traverse ensuite le tunnel de glissement porté à un potentiel fixe. A la sortie du tunnel un deuxième rhumbatron (résonateur de sortie) identique au premier entoure l'espace dit de captation. Le passage des électrons dans cet espace dont les paquets sont rythmés à la fréquence imposée par le premier rhumbatron, provoque par induction un courant H.F. dans le résonateur de sortie.

Le système fournit plus d'énergie H.F. qu'il n'en reçoit et il joue ainsi le rôle d'amplificateur.

c) Description.

— *Canon à électrons.* La cathode est à oxydes à chauffage indirect. Elle est concave ainsi que l'électrode de focalisation qui la suit (canon type de Pierce). Cette forme permet d'obtenir un faisceau de grande densité.

— *Rhumbatrons.* Ce sont des résonateurs en cuivre argentés sur les parois internes car les courants de hautes fréquences ne circulent qu'en surface (effet pelliculaire). Les klystrons peuvent être à cavités internes faisant partie de l'enceinte sous vide ou à cavités externes raccordées sur des disques en molybdène ou kovar soudés aux cylindres de verre ou céramique formant l'enceinte du tube.

— *Sorties H.F.* Elles sont constituées par des sondes (boucles de couplage) métalliques. Les sondes rayonnent dans un guide d'onde rectangulaire.

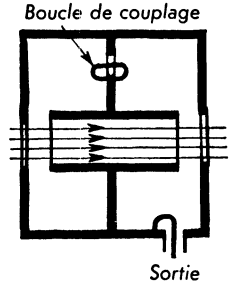


Fig. 1-104.
Klyston oscillateur

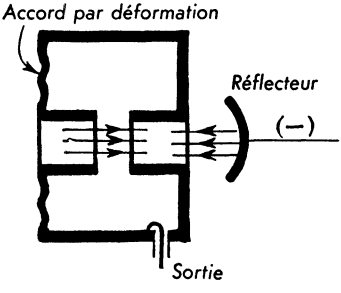


Fig. 1-105.
Klystron réflex.

— *Tunnel de glissement.* Souvent il est réuni aux résonateurs et à l'anode, l'ensemble constituant ainsi une seule pièce métallique. Le tunnel de glissement peut être fractionné en plusieurs parties appelées électrodes de glissement.

— *Anode.* Ne jouant aucun rôle en H.F. elle peut être grande pour faciliter son refroidissement. Suivant les puissances le refroidissement peut être à air (ailettes), à eau ou à la vapeur (vapotron).

— *Accord de fréquence.*

La variation de fréquence peut être obtenue en modifiant le volume des cavités soit par un système à piston ou mieux par déformation élastique des parois des cavités.

— *Klystron oscillateur.* Un klystron peut être facilement utilisé en oscillateur en couplant les deux rhumbatrons soit à l'aide d'un câble coaxial ou plus simplement par une boucle interne (fig. 1-104).

Un type de construction plus simple, le « klystron réflex » n'utilise qu'un seul résonateur. L'énergie d'entretien des oscillations est obtenue par le

retour des électrons en phase convenable, au moyen d'un « réflecteur » constitué par une électrode portée à un potentiel négatif (fig. 1-105).

L'accord d'un klystron réflex peut être obtenu soit par déformation élastique de la cavité (fig. 1-105 bis) ou par variation de la tension négative du réflecteur (accord électronique).

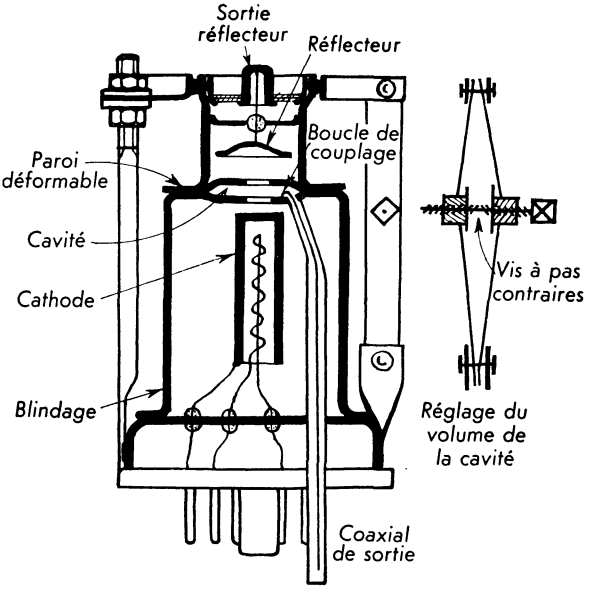


Fig. 1-105 bis. — Klystron réflex.

d) Limites d'emploi.

Les klystrons amplificateurs sont utilisés sur ondes décimétriques correspondant à des fréquences de 400 à 4 000 MHz pour des puissances moyennes de sortie de quelques dizaines de W à 200 kW. Ils sont utilisés pour l'équipement des émetteurs de radars ou des générateurs pour accélérateurs d'électrons.

Les klystrons réflex sont utilisés de 1 000 à 30 000 MHz et fournissent des puissances de quelques centaines de milliwatts. Ils sont employés comme oscillateur local sur radars centimétriques et décimétriques ou comme source d'hyperfréquences de faible puissance.

4° Tubes à ondes progressives.

a) Principe (fig. 1-106).

Le faisceau d'électrons émis par le canon électronique est accéléré sous plusieurs milliers de volts et traverse une hélice (ligne à retard de phase) dans laquelle on a injecté un signal H.F. du côté cathode dont la longueur d'onde doit être grande devant le pas de l'hélice. On constate l'existence

d'une interaction entre le faisceau électronique et le signal H.F. qui se traduit par une modulation de vitesse du faisceau. Les paquets d'électrons formés se déplacent progressivement le long de la ligne. D'autre part les paquets d'électrons réagissent sur le courant dans l'hélice ce qui provoque une amplification considérable du signal à la sortie. Le signal d'entrée se propage dans la ligne sous forme d'ondes progressives complètement absorbées à la sortie lorsque le rendement est maximum.

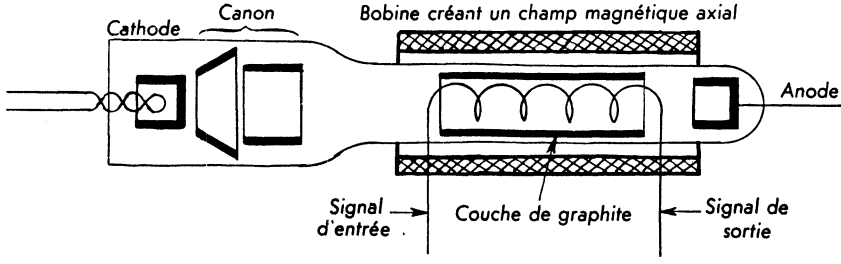


Fig. 1-106. — Tube à ondes progressives.

Le tube est placé dans un champ magnétique axial comme pour le klystron afin d'éviter la divergence du faisceau.

Une couche de graphite déposée sur l'ampoule constitue la zone atténuée ayant pour but d'absorber l'onde inverse parasite qui amènerait la formation d'ondes stationnaires.

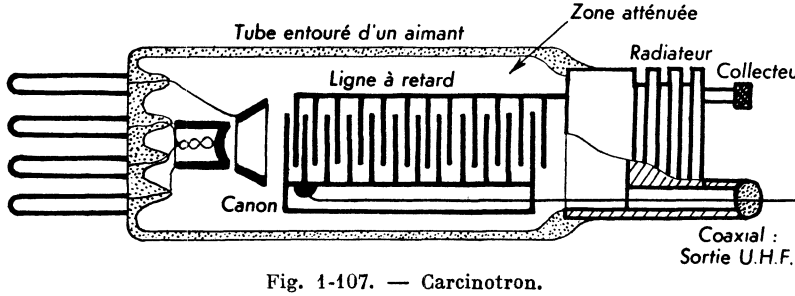


Fig. 1-107. — Carcinotron.

b) Carcinotron (C.S.F.) (fig. 1-107).

Il est constitué des mêmes éléments fondamentaux décrits ci-dessus. Le canon à électron est composé d'une cathode, d'une électrode de contrôle (wehnelt) et d'une ou plusieurs anodes.

La ligne à retard constituée précédemment par une hélice est formée ici par des peignes que le faisceau électronique vient « lécher » sur toute sa longueur. A l'extrémité se trouve le collecteur muni d'un radiateur à ailettes.

La zone atténuée absorbant l'onde inverse parasite est située ici vers l'extrémité collecteur.

La différence essentielle entre le carcinotron et les tubes à ondes progressives classiques réside dans le fait qu'une fraction de l'énergie associée à la

perturbation se déplace en direction du canon et non en direction du collecteur. Cette énergie est prélevée dans le carcinotron auto-oscillateur à l'extrémité de la ligne voisine du canon.

La focalisation magnétique est réalisée au moyen d'aimants permanents d'encombrement réduit dû à la faible longueur du tube. Ce type de tube est appelé « tube à ondes régressives ».

c) Limites d'emploi du carcinotron.

Il couvre en plusieurs modèles les fréquences de 1 000 MHz à 16 000 MHz et délivre une puissance U.H.F. de 40 à 600 mW. C'est un tube de construction simple, peu encombrant et robuste. L'accord électronique sur une large bande de fréquences est réalisé par variation de la tension d'accélération du faisceau. En agissant sur l'électrode de contrôle on peut soumettre le signal U.H.F. à une modulation d'amplitude ou à un régime d'impulsions. Le rapport signal-bruit élevé est du même ordre de grandeur que celui des klystrons réflex.

Utilisations : générateurs de signaux U.H.F., radars, faisceaux hertziens, relais T.V.

VI. TUBES A GAZ.

A - Généralités.

1° Principe.

Les tubes électroniques à structure particulière contenant certains gaz à une pression bien définie possèdent des caractéristiques spéciales qui ouvrent la voie à des utilisations très nombreuses.

L'introduction de gaz a surtout pour but d'accroître la puissance contrôlée ou de permettre l'émission de rayonnements électromagnétiques.

Nous étudierons dans ce chapitre les tubes à émission thermoélectronique et à émission électronique par champ.

2° Définitions.

a) Ionisation des gaz.

Tubes à gaz : Tube électronique dont les propriétés électriques dépendent essentiellement de l'ionisation d'un gaz ou d'une vapeur enclos dans l'enveloppe.

Ionisation : Formation d'ions par le fractionnement de molécules ou par addition ou soustraction d'électrons à des atomes ou des molécules.

L'ionisation peut être obtenue par choc d'une autre particule, par rayonnement électromagnétique ou par agitation thermique qui est une forme particulière de l'ionisation par chocs.

Energie d'ionisation : Energie minimale nécessaire pour ioniser un atome ou une molécule se trouvant primitivement à l'état normal.

Potentiel d'ionisation : Différence de potentiel nécessaire pour communiquer à un électron partant du repos, l'énergie minimale lui permettant d'ioniser par choc un atome ou une molécule se trouvant primitivement à l'état normal.

Désionisation : Disparition des ions dans un gaz ionisé.

b) Excitation des gaz.

Excitation d'un gaz : Changement de structure de certains atomes ou molécules d'un gaz, caractérisé par le passage d'un électron d'un niveau énergétique à un autre niveau plus élevé.

L'excitation peut être obtenue par choc de porteurs électrisés en mouvement ou sous l'action d'un rayonnement électromagnétique.

Excitation par degrés : Passages successifs d'un atome ou d'une molécule par des états d'excitation de niveaux de plus en plus élevés.

Energie d'excitation : Energie minimale nécessaire pour porter un atome non excité à un certain degré d'excitation.

Potentiel d'excitation : Différence de potentiel nécessaire pour communiquer à un électron partant du repos l'énergie nécessaire pour lui permettre d'exciter par choc un atome ou une molécule se trouvant primitivement à l'état normal.

c) Décharge dans les gaz.

Décharge électrique : Passage de l'électricité dans un gaz.

Décharge non autonome : Décharge caractérisée par le fait que les porteurs de charges sont produits exclusivement par un agent ionisant extérieur.

Décharge semi-autonome : Décharge caractérisée par le fait que les porteurs de charges produits par un agent ionisant extérieur acquièrent une vitesse suffisante pour ioniser à leur tour le gaz, mais insuffisante néanmoins pour maintenir la décharge quand l'action de l'agent extérieur cesse.

Décharge autonome : Décharge caractérisée par le fait qu'elle s'entretient d'elle-même après suppression de l'agent ionisé extérieur.

Décharge luminescente : Décharge autonome dans laquelle l'émission secondaire de cathode produite par le bombardement des ions positifs est prépondérante devant l'émission thermoélectronique.

Elle est appelée décharge « normale » lorsque la tension de fonctionnement reste constante ou varie en sens inverse du courant et décharge « anormale » lorsque la tension varie dans le même sens que le courant.

Décharge d'arc : Décharge caractérisée par une chute cathodique faible par rapport à celle qui se produit dans une décharge luminescente. (L'émission thermoélectronique ou par effet de champ est prépondérante).

Décharge disruptive : Décharge autonome brusque (luminescente ou d'arc) qui s'amorce entre deux électrodes pour une certaine valeur de la tension.

d) Grandeurs caractéristiques.

Chute cathodique : Différence de potentiel due à la présence d'une charge d'espace existant au voisinage de la cathode.

Chute anodique : Différence de potentiel due à la présence d'une charge d'espace existant au voisinage de l'anode.

Chute de tension dans l'arc : Chute de tension entre l'anode et la cathode en régime d'arc.

Tension d'allumage ou d'amorçage : Valeur de la tension anodique à laquelle s'établit la décharge principale, l'intervalle cathode-électrode d'amorçage n'étant pas conducteur.

Courant d'allumage ou d'amorçage : Courant qui doit passer dans l'électrode d'allumage pour provoquer l'amorçage du courant principal pour une tension anodique déterminée.

Tension d'extinction ; Valeur de la tension anodique pour laquelle s'éteint la décharge dans un tube à gaz alimenté sous tension décroissante.

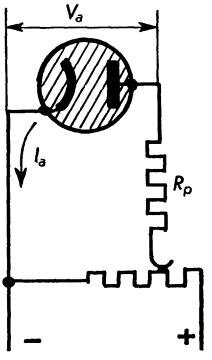


Fig. 1-108.

Tension critique de grille : Valeur de la tension de grille à l'instant où s'amorce le courant anodique, pour une tension anodique déterminée.

Plage de régulation : Différence entre les valeurs maximale et minimale de la chute de tension anodique dans une gamme déterminée du courant anodique.

Caractéristique de commande : Courbe exprimant la relation entre la tension critique de grille et la tension anodique.

Facteur de commande : Rapport de la variation de la tension anodique à la variation correspondante de la tension critique de grille, tous les autres paramètres de fonctionnement restant invariables.

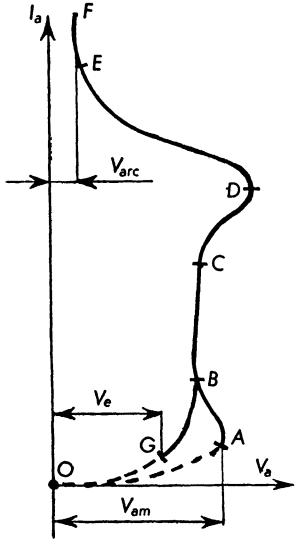


Fig. 1-109.
Caractéristiques I_a (V_a).

3° Caractéristique tension-intensité.

Soit une diode à gaz à cathode froide montée suivant le schéma de la figure 1-108. La caractéristique théorique courant-tension a l'allure de celle indiquée à la figure 1-109. On obtiendrait des courbes différentes pour chaque type de tube à gaz mais ayant des caractères communs. Les différentes parties de la caractéristique sont les suivantes :

a) Décharge non autonome : Portion OA.

Les porteurs de charge sont produits exclusivement par un agent ionisant extérieur (rayons cosmiques, radioactivité naturelle...). La décharge cesse si on supprime l'agent ionisant extérieur.

b) Décharge semi-autonome : Portion AB.

Au point A se produit l'amorçage.

A partir de cet instant les ions primaires produits par l'agent ionisant extérieur ont suffisamment d'énergie pour ioniser à leur tour le gaz. Néanmoins la décharge ne peut être entretenue sans l'agent ionisant. La tension diminue nettement.

c) Décharge luminescente normale : Portion BC.

C'est une décharge autonome qui s'entretient d'elle-même après suppression de l'agent ionisant extérieur qui a provoqué l'amorçage.

L'émission secondaire de cathode due aux chocs des ions positifs est prépondérante.

La chute cathodique est importante (centaine de volts).

Le tube s'illumine, la luminescence étant due à une recombinaison des ions positifs et des électrons.

La tension ne varie pratiquement pas alors que le courant augmente de façon importante.

d) Décharge luminescente anormale : Portion CD.

A partir du point C la cathode est recouverte complètement d'une gaine d'ions positifs et la tension augmente.

e) Décharge d'arc : Portion EF.

C'est une décharge autonome due à l'émission thermoélectronique prépondérante, car la cathode est devenue suffisamment chaude sous l'effet des chocs des ions positifs.

La chute cathodique est faible (dizaine de volts).

L'intensité peut prendre des valeurs considérables et la tension peut devenir inférieure à la tension minimale d'ionisation.

f) Extinction.

L'extinction au point G s'obtient en réduisant la tension d'alimentation à une valeur inférieure à la tension minimale d'ionisation.

Remarque :

Pour éviter la destruction des tubes à gaz par suite d'une augmentation trop importante d'intensité on les protège par une résistance Rp (fig. 1-108).

Avantages :

Les différents types de décharges sont utilisés dans de nombreux tubes mais la plupart d'entre eux fonctionnent en régime de luminescence ou en régime d'arc.

La chute de tension est indépendante du débit et faible d'où un excellent rendement.

La surface émissive de cathode peut être augmentée par plissements, ondulations, car les électrons émis dans les creux ne sont plus arrêtés par la charge d'espace comme dans les tubes à vide.

L'accroissement considérable du courant permet de contrôler des puissances cent fois plus grandes que pour les tubes à vide.

4° Gaz utilisés.

On emploie surtout des gaz monoatomiques car le libre parcours moyen des électrons entre deux chocs est plus grand permettant ainsi d'acquérir l'énergie d'ionisation suffisante. Ces gaz doivent être portés à une pression optimale car si la pression est trop faible l'ionisation est négligeable et si elle est trop grande le libre parcours moyen est trop petit et l'ionisation est faible aussi.

Les considérations précédentes ont amené à choisir surtout les gaz rares de l'air (Argon, Néon, Hélium, Krypton) monoatomiques. D'autre part ils sont inertes chimiquement et ne peuvent se combiner aux matériaux utilisés dans la construction des tubes.

Lorsqu'on emploie un gaz polyatomique (hydrogène) sa pression doit être plus faible que celle d'un gaz monoatomique (gaz rares ou vapeurs métalliques).

La vapeur de mercure constitue le gaz de remplissage de nombreux tubes haute tension. — Ses avantages et inconvénients par rapport aux gaz rares de l'air sont :

— Disparition du gaz sans importance car le tube comporte une réserve de mercure liquide. La durée de vie est ainsi augmentée.

— Les tubes à vapeur de mercure sont sensibles aux variations de température qui modifient la pression. L'intervalle de température permettant le fonctionnement est de + 10 à + 80 °C pour la vapeur de mercure et — 50 à + 90 °C pour les gaz rares.

— Les tubes à vapeur de mercure doivent être placés verticalement du fait de la réserve de Hg.

— Le temps de préchauffage est assez long (quelques minutes à une demi-heure) pour permettre d'atteindre une pression suffisante. Il est inférieur à une minute pour les autres gaz.

— Le temps de désionisation est important, limitant la fréquence d'utilisation (3 kHz). Pour les gaz rares il est d'autant plus court que les atomes sont plus petits (10 kHz).

5° Classification des principaux tubes à gaz.

Cathode chaude :

pas de commande : phanotrons;
commande par grille : thyratrons.

Cathode froide :

pas de commande : tubes stabilisateurs de tension;
commande par grille : triodes à gaz.

Cathode liquide :

pas de commande : redresseurs à vapeur de mercure;
commande par grille : excitrons;
commande par igniteur : ignitrons.

Photocathode :

cellules photo-électriques à gaz (1).

(1) Les cellules photo-électriques à gaz seront étudiées au paragraphe VII.

B - Tubes à cathode chaude.

1° Phanotrons.

a) Définition.

On appelle phanotron une diode à gaz à cathode chaude fonctionnant en régime d'arc.

b) Descriptions (fig. 1-110).

Cathodes. — Ce sont des cathodes à oxydes à chauffage indirect pour les petites puissances, et à chauffage direct pour les puissances moyennes. Leur conception (plissements divers) permet d'augmenter la surface émissive et d'économiser de la puissance de chauffage. Pour des puissances plus grandes on entoure le filament d'un cylindre de métal poli (nickel ou molybdène) qui, réfléchissant la chaleur, réduit de plus de 50 % la puissance de chauffage. Les différents modèles de cathodes seront examinés plus en détail pour les thyratrons.

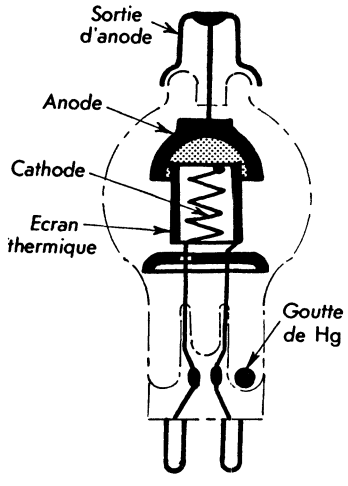


Fig. 1-110. — Phanotron.

Anodes. — La puissance perdue sur l'anode étant plus faible que dans les tubes à vide, elles sont constituées par de simples disques en nickel carburé ou mieux en graphite. Une forme couramment employée est celle de la figure 1-110 (cuvette renversée). Elle emboîte la cathode et empêche les ions et électrons vagabonds de former des charges parasites sur le verre.

Gaz. — Généralement vapeur de mercure à faible pression (1 à 10 millièmes de mm de Hg) parfois xénon ou argon.

Dans les tubes à vapeur de mercure il y a toujours une goutte de mercure de façon que la pression soit celle de la vapeur saturante.

c) Caractéristiques d'utilisation.

Tension de chauffage. — Le filament ne doit jamais être sous-volté. Il faut respecter à ± 5 % les tensions de chauffage indiquées par le constructeur.

Temps de préchauffage. — Il varie de quelques secondes à quelques minutes et doit être scrupuleusement respecté pour les tubes à vapeur de mercure.

Tension de crête anodique inverse. — C'est la valeur instantanée maximale de la tension anodique dans le sens inverse de celui du passage du courant normal, que le tube peut supporter sans dommage.

Courant moyen anodique maximal. — C'est le courant moyen maximal qui peut traverser le tube en régime permanent.

Courant de crête anodique maximal. — C'est le courant instantané le plus élevé que le tube peut transporter dans le sens direct dans des conditions normales d'emploi.

d) Limites d'emploi.

Les divers modèles permettent des tensions de crête inverses de pointe de 1 000 à 30 000 V avec des intensités de crête de 0,5 à 50 ampères (intensité moyenne de 0,1 à 20 ampères).

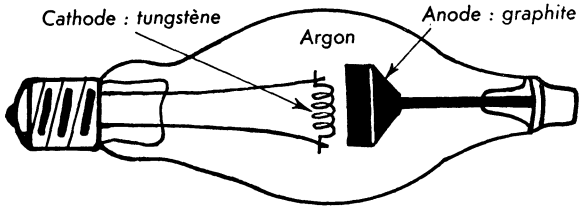


Fig. 1-111. — Lampe Tungar.

Les phanotrons sont essentiellement des valves destinées au redressement et sont le plus souvent à vapeur de mercure sauf là où des conditions de température exigent l'emploi de gaz rares.

Les lampes du type « Tungar » à haute pression (0,1 à 10 cm de Hg) redressent des intensités d'une dizaine d'ampères sous 6 ou 12 volts pour la recharge d'accumulateurs (fig. 1-111).

2° Thyratrons.

a) Définition.

Le thyratron est un tube à gaz à cathode chaude, dans lequel une ou plusieurs électrodes de commande ont pour objet de permettre l'amorçage du courant de décharge, sans toutefois pouvoir agir sur le régime de décharge (sauf dans certaines conditions particulières de fonctionnement). *Ils fonctionnent en régime d'arc.*

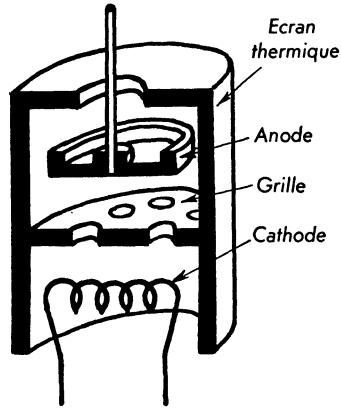


Fig. 1-112. — Thyratron.

b) Description.

Bien que comportant les mêmes éléments (cathode, anode et grille) qu'une triode à vide, le fonctionnement et la construction sont très différentes (fig. 1-112).

La disposition des électrodes est différente, car les électrons peuvent avoir des trajectoires incurvées.

Pour une certaine valeur de la tension de grille V_g égale ou inférieure à une valeur critique, le tube s'amorce et fonctionne comme un phanotron.

La grille ne peut plus supprimer l'amorçage ni contrôler le courant car c'est l'action de la gaine d'ions entourant la cathode qui est prépondérante. Pour désamorcer le tube, il faut réduire la tension d'anode au-dessous de la tension d'extinction.

Fig. 1-113

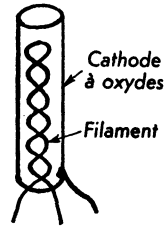


Fig. 1-114

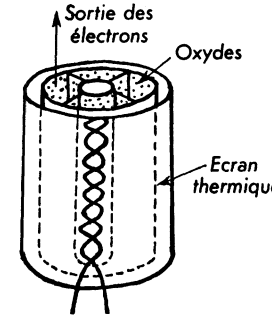


Fig. 1-115

Fig. 1-116

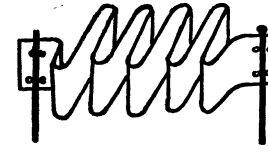


Fig. 1-117

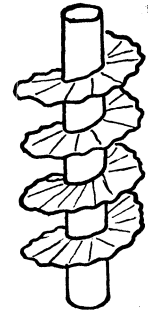


Fig. 1-118

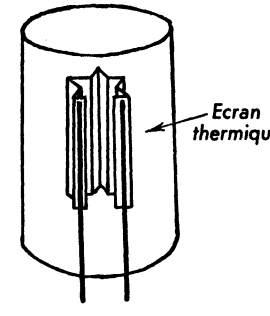


Fig. 1-113 à 1-118. — Cathodes de thyratrons.

Cathodes. — Ce sont des cathodes à oxydes.

Pour de petites puissances on emploie des cathodes en nickel cylindriques à chauffage indirect avec filament « spiralé » (fig. 1-113) ou des cathodes en fil de tungstène doublement spiralé qui a l'avantage de retenir l'oxyde émissif dans les alvéoles (fig. 1-115).

Pour réduire la puissance de chauffage (50 à 70 %) la cathode est entourée d'un cylindre poli en nickel (ou molybdène) appelé écran thermique et qui réfléchit la chaleur (fig. 1-118).

Pour augmenter la surface émissive on dépose les oxydes dans des alvéoles (fig. 1-114), ou sur des surfaces ondulées ou plissées (fig. 1-116 à 1-118). Ces

cathodes ne pourraient pas être utilisées dans des tubes à vide car la charge d'espace empêcherait les électrons de sortir des alvéoles.

Des cathodes à réserve (70 % d'oxyde de baryum BaO et 30 % d'alumine Al_2O_3) peuvent être utilisées pour augmenter la durée de vie.

Grilles.

Elles sont en nickel, métal ne donnant qu'une faible émission secondaire.

Leur forme très différente de celles utilisées dans les tubes à vide doit :

— empêcher l'action sur l'arc des charges électriques acquises éventuellement par l'ampoule;

— permettre à l'arc de ne suivre qu'une seule direction entre la cathode et l'anode;

— faciliter son propre refroidissement afin d'empêcher toute émission de grille.

En conséquence la grille ayant une grande surface entoure complètement les électrodes et comporte un diaphragme percé de un ou plusieurs trous laissant passer l'arc.

La dimension des trous est d'autant plus grande que l'on désire un amorçage du thyratron pour une tension négative de grille élevée.

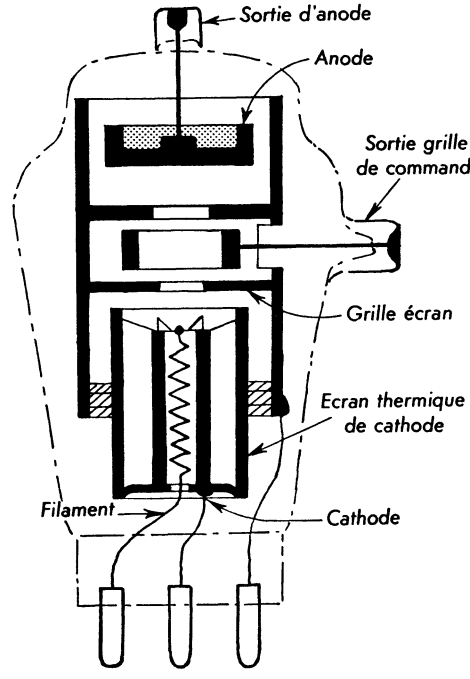


Fig. 1-119. — Thyratron tétrode.

Anodes.

Comme pour les phanotrons ce sont des plaques en nickel carburé pour les petites puissances ou des cylindres en graphite pour les puissances plus élevées avec sortie généralement au sommet de l'ampoule.

Gaz.

Le plus souvent on emploie la vapeur de mercure. L'emploi d'argon permet l'utilisation à des fréquences plus élevées car le temps de désionisation est plus faible (0,1 ms au lieu de 1 ms),ainsi que l'hydrogène qui permet d'atteindre des fréquences de l'ordre de 100 kHz — (temps de désionisation 0,001 ms).

Thyratron tétrode (fig. 1-119 et 1-120).

L'adjonction d'une deuxième grille (grille écran) permet de réduire le courant de grille de commande et la capacité anode-grille de commande.

En modifiant sa tension on déplace la caractéristique de commande permettant l'emploi du thyratron avec commande négative ou positive.

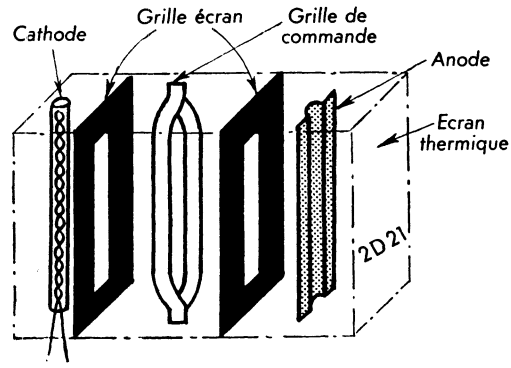


Fig. 1-120. — Thyratron tétrode.

c) Caractéristiques d'utilisation.

Tension de chauffage. — Voir phanotron.

Temps de désionisation. —Il dépend de la nature du gaz de remplissage et permet de connaître la limite de fréquence d'utilisation du thyratron.

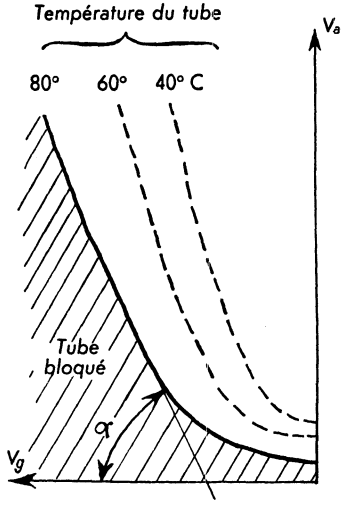


Fig. 1-121.
Caractéristique de commande (thyratron à vapeur de Hg).

Caractéristique de commande (fig. 1-121). — Elle montre la relation entre les tensions grille et anode permettant l'amorçage. Dans le cas de tubes à gaz inerte elle est peu affectée par la température.

La caractéristique de commande d'un thyratron tétrode dépend de la tension appliquée à la grille écran (fig. 1-122).

Tension de crête anodique inverse, voir phanotron. — Elle ne doit pas être dépassée pour éviter l'arc de retour.

Tension de crête anodique directe. — C'est la valeur instantanée maximale de la tension anodique dans le sens de passage de courant normal. Pour les tubes à vapeur de mercure elle dépend notamment de l'emploi dans les conditions de température spécifiées. Elle ne doit pas être dépassée pour conserver la commande par grille.

Courant moyen anodique max, voir phanotron. — Il ne doit pas être dépassé afin d'éviter un échauffement exagéré.

Courant de crête anodique max, voir phanotron. — Son dépassement risque d'amener la destruction de la cathode.

Facteur de commande. — C'est le rapport $\frac{\Delta V_a}{\Delta V_g}$ mesuré par tg α sur la caractéristique de commande (fig. 1-120).

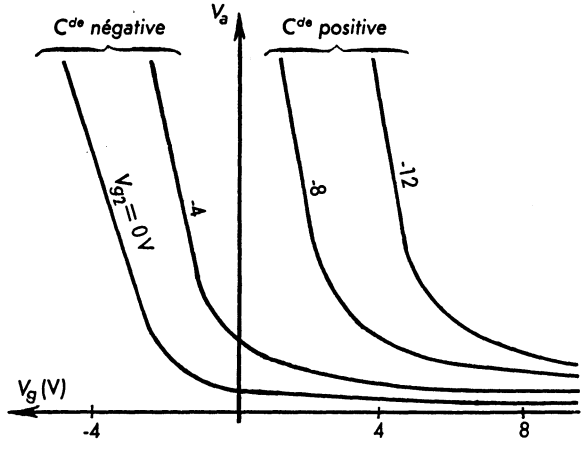


Fig. 1-122. — Caractéristique de commande d'un thyratron tétrode.

d) Utilisations.

Redressement. — Les thyratrons permettent le redressement à puissance variable par modification de la tension de commande (amplitude ou déphasage) appliquée à la grille. Les applications principales de cette propriété sont le réglage de la vitesse des moteurs, la variation progressive de l'éclairement, le réglage de l'intensité sur machines à souder par résistance, la régulation de tension, d'intensité, de fréquence, de température.

Oscillations de relaxation. — Elles sont obtenues par charge et décharge successives d'un condensateur placé entre cathode et anode. Utilisation pour le balayage de certains oscilloscopes.

Relais. — Les thyratrons permettent la réalisation de relais sensibles et rapides déclenchés par l'action d'une impulsion positive sur la grille.

Production de grande puissance instantanée. — Les puissances instantanées obtenues de plusieurs milliers de kW au moyen de thyratrons à hydrogène servent à la production d'impulsions sur les modulateurs pour radar.

3° Tubes fluorescents.

a) Principe.

Ce sont des tubes à gaz à cathode chaude fonctionnant en régime d'arc. On introduit dans le tube en verre ou quartz une goutte de mercure et un gaz neutre de remplissage (mélange de néon, d'argon et d'azote). Ils sont étudiés de façon que la vapeur de mercure rayonne principalement dans l'ultraviolet pendant le fonctionnement.

Le revêtement interne du tube est constitué par une couche fluorescente qui absorbe le rayonnement U.V. et réémet de la lumière visible dont le spectre dépend de la substance utilisée.

b) Différents types.

Tubes à basse pression. — Leur constitution simple est illustrée à la figure 1-123. La pression interne est de quelques millimètres de Hg. Ces lampes fonctionnent en basse tension bien que l'amorçage nécessite parfois l'application d'une tension supérieure à 250 V. Il existe différentes réalisations selon le mode d'amorçage (starter, transformateur de préchauffage, inductance d'amorçage, électrode auxiliaire). La solution la plus employée utilise un interrupteur automatique appelé starter qui établit le circuit de chauffage puis le coupe après amorçage :

— Longueur des tubes : 0,36 à 1,5 m.
— Puissance : 16 à 100 W.
— Flux lumineux : 600 à 5 000 lm.

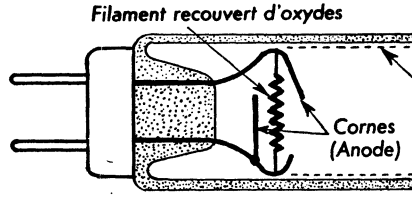


Fig. 1-123. — Tube fluorescent.

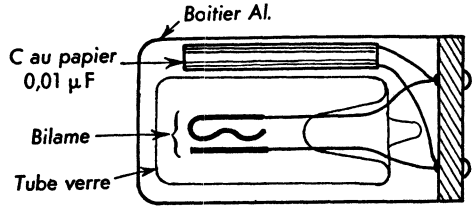


Fig. 1-124. — Starter.

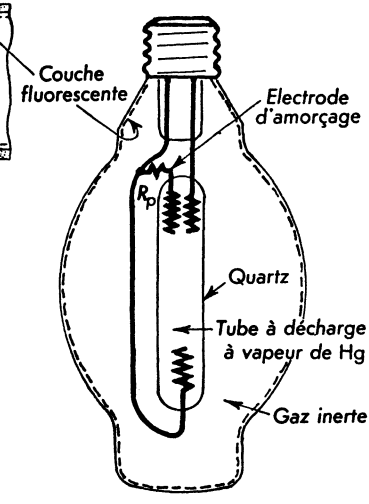


Fig. 1-125. — Lampe ballon.

Le circuit est représenté à la figure 1-126 et le principe du starter à la figure 1-124. C'est une petite lampe au néon comportant un bilame qui pendant le chauffage court-circuite le tube fluorescent. Après quelques secondes le starter se refroidit et le contact s'ouvre. Cette coupure produit par l'intermédiaire d'une bobine la surtension nécessaire à l'amorçage. Le condensateur aux bornes du starter améliore l'amorçage et diminue les parasites produits.

Ces tubes faciles à installer sont destinés à l'éclairage des appartements et des bureaux.

Parmi les substances fluorescentes utilisées citons le tungstate de calcium (bleu), le silicate de zinc (vert), le silicate de cadmium (jaune).

Tubes à haute pression, lampes ballon. — La figure 1-125 en montre les détails constructifs.

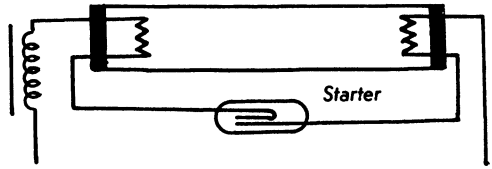


Fig. 1-126. — Tube fluorescent.

La forme spéciale est étudiée pour obtenir une surface isotherme dont la température est comprise entre 150 et 300 °C. La pression est de l'ordre de 10 atmosphères.

La couche fluorescente est généralement un mélange de silicates de baryum, strontium et lithium. Ces lampes basse tension prévues pour des puissances de 80, 125, 250 et 400 W produisent un flux lumineux compris entre 3 000 et 18 000 lm. Elles sont utilisées pour l'éclairage des grands espaces découverts, parking, gares etc.

Tubes à haute tension et basse pression. — Ils sont utilisés pour l'éclairage des usines et là où l'emploi de haute tension est sans inconvénient.

C - Tubes à cathode froide.

1° Stabilisateurs de tension.

a) Principe.

On utilise des diodes à gaz à cathode froide montées suivant le principe de la figure 1-127. La tension à stabiliser est appliquée au tube à travers la

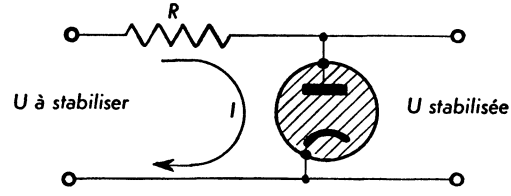


Fig. 1-127. — Stabilisateur de tension.

résistance R. Le tube fonctionne en régime de luminescence dans la partie de la caractéristique (I_a, V_a) dans laquelle une très faible variation de tension entraîne une variation considérable du courant. Lorsque la tension

à stabiliser varie par exemple de ± 10 V le courant traversant le stabilisateur varie de façon importante mais sa tension aux bornes varie très peu (± 0,3 V). Dans ce cas la plage de régulation est de 0,6 V (fig. 1-128).

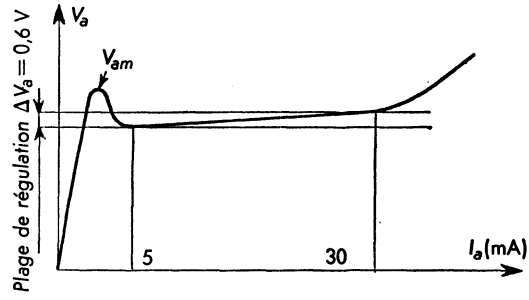


Fig. 1-128. — Régulation de tension.

b) Description.

Les électrodes anode et cathode sont concentriques en nickel (fig. 1-129) ou constituées par 2 tiges identiques enroulées en hélice (fig. 1-130). Dans le cas de faibles tensions à stabiliser (60 à 100 V) la cathode est recouverte d'oxyde de baryum pour en augmenter le coefficient d'émission secondaire dû à l'impact des ions.

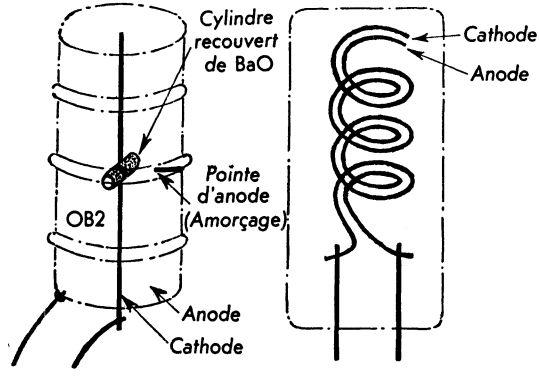


Fig. 1-129 Fig. 1-130.
Stabilisateurs de tension.

c) Gaz.

La chute de tension dans le tube dépend de la nature et de la pression du gaz (loi de Paschen) (1). On utilise surtout l'hélium et le néon sous une pression de l'ordre du millimètre de mercure. Pour réduire la tension nécessaire à l'amorçage on ajoute un peu d'argon.

(1) Loi de Paschen : la tension d'amorçage est proportionnelle au produit pression du gaz par la distance entre électrodes.

d) Utilisations.

Les tubes stabilisateurs de tension donnent des tensions régulées de 85 V à 280 V pour des débits maxima allant de 4 à 100 mA, avec des dérives de tension de 0,1 à 0,3 %.

Il peuvent être aussi utilisés comme oscillateurs de relaxation à basse fréquence (jusqu'à quelques milliers de Hz).

Parmi les tubes stabilisateurs de tension citons les tubes 0A2, 0B2, 85A1, 85A2 et 100E1 (qui contrôle jusqu'à 200 mA).

2° Tubes à décharge pour éclairage.

a) Tubes luminescents.

Ce sont des tubes à haute tension (tension de régime supérieure à 250 V) et à basse pression (quelques mm de Hg) fonctionnant en régime de luminescence.

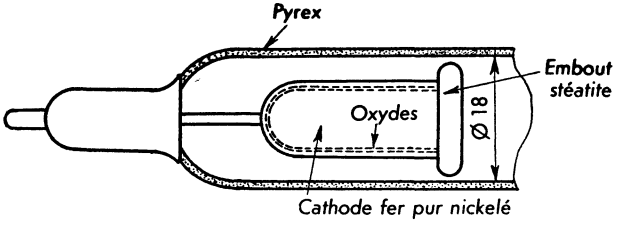


Fig. 1-131. — Tube luminescent.

Les électrodes sont constituées par des coquilles de fer pur nickelé ou aluminisé revêtues intérieurement d'oxydes (fig. 1-131). L'allumage est pratiquement instantané par application de la tension d'amorçage.

Ces tubes ont une efficacité lumineuse faible (10 lm/W environ) et sont utilisés pour les enseignes lumineuses et les effets décoratifs. Leur couleur est fonction du gaz utilisé (néon : rouge — azote : jaune orangé — anhydride carbonique : bleu pâle — hydrogène : vert, etc.)

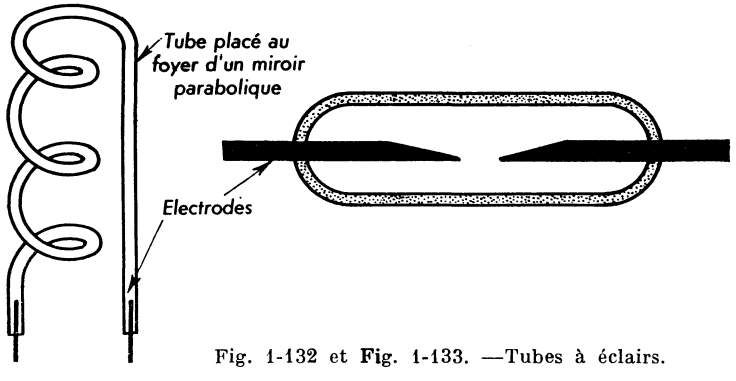


Fig. 1-132 et Fig. 1-133. —Tubes à éclairs.

b) Tubes à éclairs (fig. 1-132 et 133).

Ce sont des tubes à gaz haute pression fonctionnant pendant un temps très court (0,001 s) en régime d'arc et fournissant une lumière à très haute

intensité (10 000 à 10 000 000 lm) utilisées comme lampes « flash » en photographie, en stroboscopie ou en cinéma ultra-rapide.

Le gaz de remplissage est du krypton. L'éclair est obtenu au moyen de la décharge d'un condensateur.

3° Tubes compteurs de radiations (1).

Un certain nombre de dispositifs électroniques ont été étudiés en vue de détecter et mesurer l'intensité des radiations telles que les rayons α (noyaux d'hélium) rayons β (électrons animés de grande vitesse) rayons γ et rayons X (photons de grande énergie). Le dispositif le plus classique est le compteur de Geiger. Il comprend :

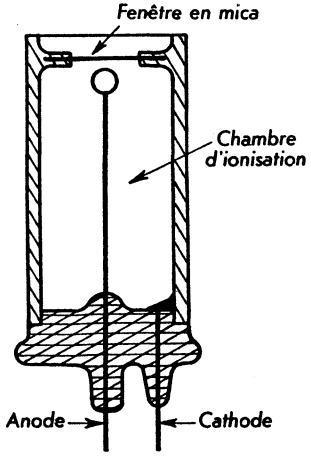


Fig. 1-134.
Tube compteur de radiateurs.

— une chambre d'ionisation (fig. 1-134) comportant deux électrodes entre lesquelles on établit une tension continue. Le rayonnement traverse une fenêtre en mica et ionise le gaz du tube.

Le courant produit est proportionnel à l'intensité de ce rayonnement (décharge non autonome) :

— un tube amplificateur;

— un écouteur ou un numérateur suivant l'usage. Ces compteurs sont utilisés dans la prospection des minerais radioactifs, dans la protection contre les radiations. Ils peuvent enregistrer jusqu'à 10 000 particules par seconde.

4° Thyratrons à cathode froide.

Ce sont des triodes à gaz à cathode froide comportant une cathode à grande surface, une anode et une électrode d'amorçage (starter).

Une tension positive inférieure à la tension d'amorçage est appliquée en permanence à l'anode. Lorsqu'un signal peu important est appliqué à l'électrode d'amorçage une faible décharge se produit entre celle-ci et la cathode et le tube s'amorce.

Ils trouvent de nombreuses applications en téléphonie, dans les machines à calculer, les minuteries de soudeuses électriques et comme commutateurs électroniques.

5° Autres tubes à gaz à cathode froide.

a) Tubes pour tension de référence.

C'est une diode à gaz stabilisatrice de tension sur laquelle on a pris des précautions particulières pendant la fabrication pour assurer des caractéristiques très stables

(1) Voir aussi compteur à scintillations, page 102.

La cathode est constituée par du molybdène à haut degré de pureté. Le gaz utilisé a subi une purification spéciale et la surface interne de l'ampoule est traitée pour éliminer toute source de contamination des électrodes.

b) Tubes au néon.

Ils servent comme indicateurs de tension car ils s'illuminent lorsqu'une de leurs électrodes est mise en contact avec un circuit alternatif de tension suffisante.

Certains sont utilisés en basse tension comme lampes témoins en raison de leur très faible consommation.

La figure 1-87 montre un tube au néon employé comme indicateur d'accord. L'anode auxiliaire sous tension maintient le tube ionisé. L'anode principale est maintenue à une tension légèrement inférieure à la tension d'amorçage. Lorsque le potentiel d'anode augmente l'illumination se produit. Elle est fonction de l'augmentation du potentiel d'anode.

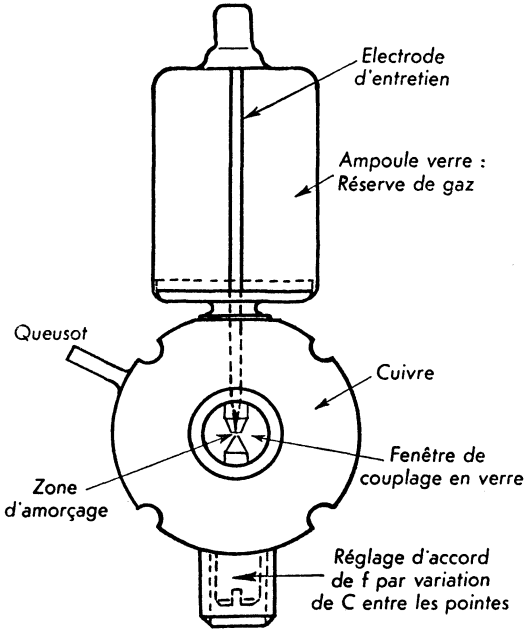


Fig. 1-135. — Commutateur à gaz (tube T R).

c) Cartouches à gaz rare.

Ce sont des tubes limiteurs de tension de construction particulièrement robuste destinés à protéger les équipements électriques contre les dangers de tensions excessives. On utilise le fait que la décharge d'arc permet la transmission de courants très élevés qui sont dérivés à la terre. Aux basses tensions usuelles le gaz ne s'ionise pas et la résistance du tube est infinie.

Ils sont utilisés comme parafoudres sur les lignes téléphoniques aériennes ou sur les antennes de radiodiffusion.

d) Le décatron.

Il est utilisé comme tube compteur dans certains calculateurs électroniques. Il comporte une anode centrale entourée de dix cathodes. A un instant donné la décharge ne se produit qu'entre une seule cathode et l'anode. Entre les cathodes adjacentes se trouvent des électrodes de transfert auxquelles sont appliquées les impulsions à compter. A chaque impulsion la décharge est déviée d'une cathode à la suivante. Lorsque la décharge a fait un tour complet du tube une impulsion de comptage est envoyée à un second tube similaire qui marquera par exemple les dizaines. Il suffit d'ajouter d'autres tubes pour enregistrer les centaines, les milliers, etc.

e) Alternats (commutateurs à gaz TR, ATR) (fig. 1-135).

Ce sont des portions de guides d'ondes contenant de l'argon sous une pression de l'ordre de 10 millimètres de mercure. Ils sont placés sur les installations de radar entre l'antenne et le récepteur émetteur. Le tube TR court-circuite, en s'amorçant, le guide d'onde du récepteur lorsque l'émetteur fonctionne. Après l'impulsion de départ, il se désamorce, ouvrant la voie à la réception de l'écho. Le tube ATR court-circuite le guide d'onde de l'émetteur lorsque le récepteur fonctionne.

D - Tubes à cathode liquide.

1° Redresseur à vapeur de Hg.

a) Principe (fig. 1-136).

Le tube en verre comporte une cathode liquide de mercure et une anode en graphite. En fonctionnement normal un arc se maintient entre l'anode et une zone lumineuse de la cathode dans laquelle est concentré le courant (tache cathodique).

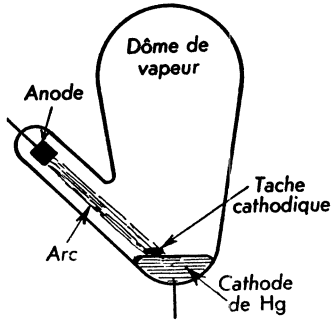


Fig. 1-136.

Les électrons qui se dirigent vers l'anode ionisent par choc la vapeur de mercure. Les ions positifs se concentrent dans une zone située près de la surface du mercure et créent un champ électrique intense qui extrait les électrons du mercure. Il y a *émission par champ électrique.*

La densité du courant atteint 4 000 A/cm².

La tache cathodique se déplace rapidement sur la surface du mercure.

Ce procédé permet le redressement à grande puissance.

b) Description d'une soupape polyanodique.

C'est un redresseur à vapeur de mercure de puissance, utilisé pour le redressement du courant triphasé à partir d'un transformateur triphasé (fig. 1-137).

Cathode : Mercure liquide.

Anodes principales : Cylindres de graphite.

Anode d'amorçage : Elle est constituée par un bilame prolongé par une pointe touchant normalement la surface du mercure. Lorsque le courant d'amorçage passe dans le bilame il s'échauffe; la pointe sort du mercure en produisant une étincelle permettant l'amorçage.

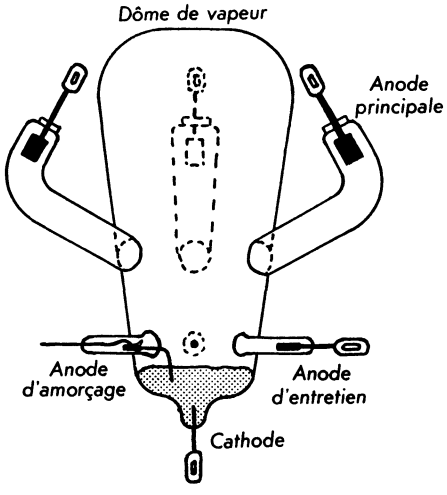


Fig. 1-137. — Soupape polyanodique.

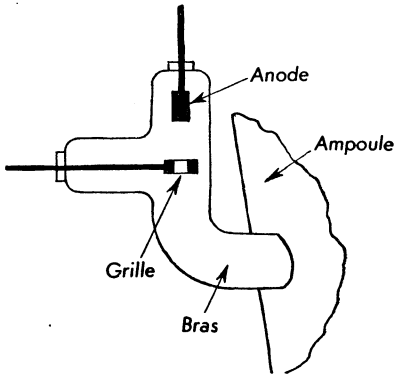


Fig. 1-138.

Anodes d'entretien : Lorsque la tension alternative tombe à zéro l'arc s'éteint et on fait appel à des électrodes auxiliaires alimentées en courant continu permettant le maintien de l'arc.

Ampoule : (En verre). Elle comporte un dôme sur lequel vient se condenser la vapeur de mercure projetée verticalement par la tache cathodique.

Les bras ont une forme étudiée en vue de protéger les anodes du jet de vapeur, de diminuer la possibilité de l'arc de retour et d'empêcher les arcs entre anodes.

Grille : Les soupapes à vapeur de mercure peuvent comporter des grilles placées près des anodes et portées à une tension négative. Elles limitent l'arc de retour par désionisation de l'espace autour de l'anode. Elles permettent, comme pour les thyratrons, de régler l'instant d'allumage et d'agir sur la valeur de la tension redressée. Elles n'ont pas d'effet sur l'arc lorsqu'il est amorcé (fig. 1-138).

c) Avantages.

— Possibilité de grands débits : plusieurs milliers d'ampères.

— Cathode de mercure très robuste permettant une durée de vie pouvant atteindre 150 000 heures.

— Surcharges de courte durée bien supportées.

— La tension d'amorçage directe V_{am} est faible et inférieure à 30 V.

— La tension d'amorçage inverse est très grande et peut dépasser 25 000 V, ce qui permet le redressement de tension alternative de forte valeur.

d) Inconvénients.

— Le bombardement de l'anode par des ions positifs peut l'échauffer et amener une émission thermo-électronique produisant un retour d'arc. On diminue sa possibilité de formation par la forme des bras et l'utilisation d'anodes en graphite ou de grilles de désionisation. Les installations doivent être protégées contre les surintensités produites par l'allumage en retour par des fusibles et des disjoncteurs.

— L'allumage est difficile en dessous de 15 °C environ. Pour le faciliter en dessous de cette température on ajoute un peu d'argon dans le tube.

e) Utilisations.

Les redresseurs à vapeur de mercure à ampoule de verre ne dépassent pas quelques dizaines de kW. Ils peuvent être utilisés pour la charge de batterie d'accumulateurs, pour l'électrolyse et en petite traction. Ils sont sérieusement concurrencés par les redresseurs à enveloppe métallique examinés ci-après.

Une application particulière des tubes à vapeur de mercure à cathode liquide est le tirage des plans sur papier héliographique en utilisant l'émission de rayons ultra-violets.

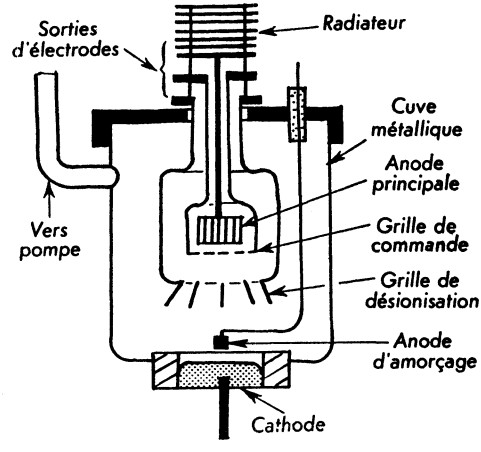


Fig. 1-139. — Excitron.

2° Excitron.

a) Principe.

C'est un tube redresseur à gaz monophasé à cathode de mercure et comportant une électrode d'entretien et un dispositif mécanique d'amorçage.

b) Description (fig. 1-139).

Cathode en mercure contenu dans une cuve métallique.

Anode en graphite fixée sur une tige métallique surmontée d'un radiateur à ailettes.

Grille de commande : Enveloppe percée de trous et enveloppant l'anode. Elle règle l'instant d'amorçage et permet de régler la tension redressée.

Grille de désionisation : C'est un déflecteur activant la désionisation et protégeant l'anode des jets de vapeur de mercure.

Electrode d'amorçage : C'est un dispositif permettant d'actionner de l'extérieur un plongeur créant un contact de courte durée entre la cathode et l'anode d'entretien.

Anode d'entretien : Elle maintient la tache cathodique en l'absence de débit dans l'anode principale.

Enveloppe : C'est une cuve en acier refroidie par air ou par eau suivant la puissance.

c) Limites d'emploi.

Redressement pour des puissances atteignant 3 000 kW avec des débits de plusieurs milliers d'ampères. En dessous de 250 A ils sont scellés et au-dessus le vide doit être maintenu au moyen d'une installation de pompage.

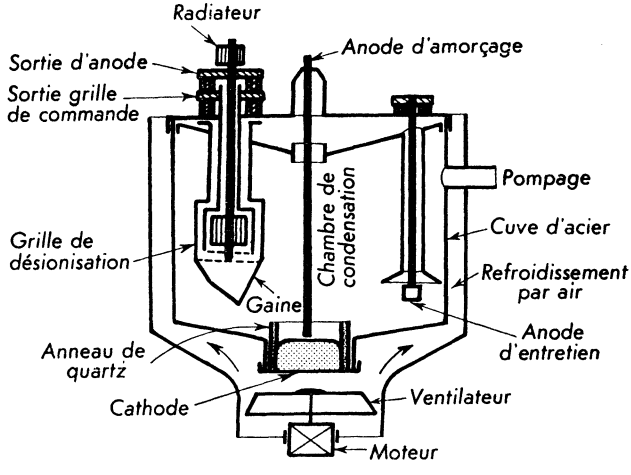


Fig. 1-140. — Mutateur.

3° Mutateur.

a) Description.

C'est une soupape polyanodique à cuve d'acier. Le principe est semblable à celui des soupapes à ampoule de verre. Les détails constructifs sont donnés à la figure 1-140. Les mutateurs peuvent comportés 12, 18 et même 24 anodes. Ils sont refroidis par circulation d'air ou d'eau.

b) Limites d'emploi.

Le courant moyen redressé peut dépasser 10 000 A et la puissance atteindre 6 000 kW.

Les mutateurs ainsi que les excitrons équipent les sous-stations alimentant les réseaux de traction électrique. Ils sont utilisés aussi en métallurgie en particulier pour l'électrolyse qui nécessite des courants redressés importants.

4° Ignitron.

a) Principe.

L'ignitron est un tube redresseur à vapeur de mercure mono-anodique comportant une électrode d'allumage fixe partiellement immergée dans le mercure et appelée igniteur.

L'igniteur est constitué par un semi-conducteur qui n'est pas mouillé par le mercure (fig. 1-141). Lorsqu'on applique une tension de 200 à 300 V entre l'igniteur et le mercure, une tache cathodique apparaît, due à un champ électrique très intense.

L'igniteur permet de commander l'instant de la décharge entre la cathode et l'anode et par suite la valeur du courant redressé.

Fig. 1-141

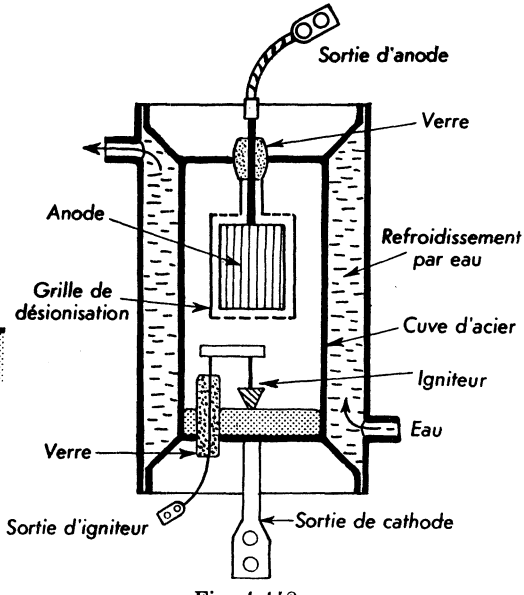


Fig. 1-142. Ignitron.

b) Description (fig. 1-142).

Cathode : Mercure non isolé de la cuve, ce qui simplifie la construction.

Anode : En graphite de dimension importante avec traversée isolante en verre.

Igniteur : En carbure de bore ou de silicium obtenu par frittage. La tige support servant à l'amenée de courant est isolée de la cuve.

Grille de désionisation : En graphite. Elle entoure complètement l'anode et la protège contre le jet de vapeur (elle n'existe pas pour les petites puissances).

Enveloppe : Cylindre en acier à double enveloppe refroidi par eau.

c) Limites d'emploi.

Il existe des ignitrons scellés donc étanches pour des puissances de plusieurs centaines de kW. Ils sont surtout utilisés comme contacteurs électroniques dans la commande des soudeuses électriques par résistance. Ils fournissent un courant de crête de 1 000 A pendant 1 s ou de 4 000 A pendant 0,1 s (sous des tensions de 300 à 750 V).

Les ignitrons pompés de 500 kW à plusieurs milliers de kW dont on entretient le vide par pompage sont utilisés comme redresseurs industriels pour l'électrolyse ou l'alimentation de moteurs à fort courant de démarrage (traction, laminoirs...).

VII. TUBES ET DISPOSITIFS PHOTO-ÉLECTRIQUES.

A - Généralités.

1° Principe.

Un tube ou une cellule photo-électrique sont capables de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Suivant les types elles sont sensibles à des rayonnements infra-rouge, visibles ou ultra-violet.

Les grains ou « quanta » d'énergie appelés photons qui frappent le matériau utilisé dans les tubes ou cellules photo-électriques arrachent des électrons aux atomes. Malheureusement le rendement quantique (1) est faible (de l'ordre de 1 %). Le reste de l'énergie est transformé en chaleur.

2° Définitions.

a) Unités optiques.

Intensité lumineuse : candéla — (cd) ou bougie nouvelle (B).

La candéla est l'unité d'intensité lumineuse telle que la brillance d'un corps noir à la température de solidification du platine vaille 60 candélas par cm^2.

(1) Rendement quantique : rapport du nombre d'électrons émis au nombre de photons absorbés.

Brillance ou luminance : nit — (cd/m^2).

Le nit ou candéla par m^2 est la brillance d'une source lumineuse ayant une surface apparente de 1 m^2 perpendiculairement à la direction considérée et dont l'intensité lumineuse dans cette direction vaut 1 candéla.

Autre unité : le stilb = 1 cd/cm^2.

Flux lumineux : lumen — lm.

Le lumen est le flux lumineux émis, dans un angle solide de 1 stéradian (1), par une source ponctuelle, ayant une intensité lumineuse de 1 candéla.

Eclairement : lux — lx.

Le lux est l'éclairement d'une surface de 1 m^2 qui reçoit normalement, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux de 1 lumen.

b) Effet photo-électrique.

Effet photo-électrique : Phénomène d'interaction entre le rayonnement et la matière, caractérisé par l'absorption de photons et la libération consécutive d'électrons.

Photo-émission : ou effet photo-électrique externe. Emission électronique résultant uniquement d'un rayonnement énergétique incident.

Photo-conduction : ou effet photo-électrique interne. Effet photo-électrique dans un solide se manifestant par une variation de la résistivité du corps irradié.

Effet photovoltaïque : Effet photo-électrique qui se manifeste par l'apparition d'une force électromotrice au contact entre un métal et un semi-conducteur.

Photon : Quantité élémentaire d'énergie rayonnante (quantum) dont la valeur est égale au produit de la fréquence f du rayonnement électromagnétique par la constante de Planck (2) : $W = h.f$.

Seuil de fréquence : Fréquence de l'énergie radiante incidente au-dessous de laquelle l'effet photo-émissif est nul.

Seuil de longueur d'onde photo-électrique : Longueur d'onde de l'énergie radiante incidente au-dessus de laquelle l'effet photo-émissif est nul.

Courant d'obscurité : Courant débité dans le circuit extérieur d'un tube ou d'une cellule photo-électrique en l'absence d'irradiation.

Sélectivité spectrale : Variation de l'effet photo-électrique en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Traînage : Courant résiduel décroissant qui subsiste après qu'a cessé brusquement l'irradiation du tube ou de la cellule.

Caractéristique spectrale : Courbe exprimant la relation entre la sensibilité et la longueur d'onde d'un rayonnement incident.

(1) Stéradian : Angle solide ayant son sommet au centre d'une sphère découpant sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un cadre ayant pour côté le rayon de la sphère.

(2) Constante de Planck. $h = 6{,}6.\ 10^{-34}$ Js.

Sensibilité statique : Quotient du courant anodique continu par le flux énergétique incident supposé constant. $S = I_a/\Phi$.

Pour un tube photo-électrique elle est donnée pour une tension déterminée entre anode et cathode. Pour une cellule photo-électrique, elle est donnée en court-circuit.

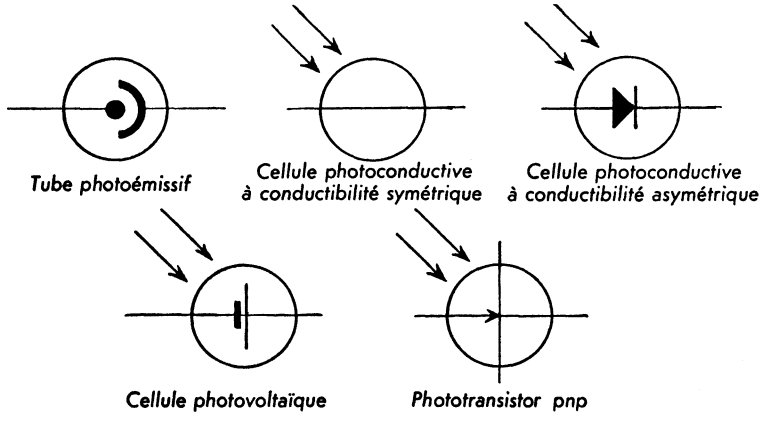


Fig. 1-143 à Fig. 1-147.

Sensibilité dynamique : Quotient de la composante sinusoïdale infinitésimale du courant anodique par la composante sinusoïdale correspondante du flux énergétique incident, pour une tension donnée entre anode et cathode. $S_1 = \mathrm{d}I_a/\mathrm{d}\Phi$.

Facteur d'amplification du gaz : Facteur qui exprime l'accroissement de sensibilité d'un tube photo-électrique à gaz dû seulement à l'ionisation du gaz.

3° Représentation schématique (fig. 1-143 à 1-147). Normes NF C 03-390 et SITELEC 314.

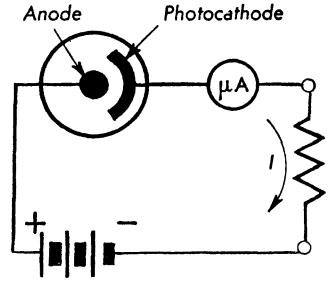


Fig. 1-148.

B - Effet photo-émissif.

1° Tubes photo-émissifs à vide.

a) Principe (fig. 1-148).

Le flux lumineux vient frapper la photocathode. Les électrons émis sont captés par l'anode portée à un potentiel positif par rapport à la cathode. Un courant de quelques milliampères s'établit dans le circuit.

La loi d'Einstein exprime que l'énergie cinétique d'un électron émis est égale à l'énergie du photon incident diminuée du travail d'extraction.

$$1/2\ m.v^2 = h.f - W_s.$$

m et v : masse et vitesse du photon émis;
h : constante de Planck;
f : fréquence du photon;
W_s : travail d'extraction.

Pour qu'un électron soit expulsé il faut que $h.f$ soit supérieur au travail d'extraction. A chaque métal correspond un seuil de fréquence f_s au-dessous duquel l'émission photo-électrique ne se produit pas ($h.f_s = W_s$).

Ce sont les métaux alcalins et alcalino-terreux qui admettent le travail d'extraction le plus faible et sont sensibles aux radiations visibles.

b) Caractéristiques d'utilisation.

— *Caractéristique I_a (V_a).*

La figure 1-149 montre pour différentes valeurs du flux lumineux la variation du courant en fonction de la tension d'anode.

Au-dessus d'une certaine tension d'anode (20 à 40 V) on atteint le régime de saturation et le courant (quelques μ A) reste sensiblement constant.

Les courbes sont analogues à celles étudiées pour les diodes à vide : régime de charge d'espace pour les tensions faibles et régime de saturation pour les tensions élevées.

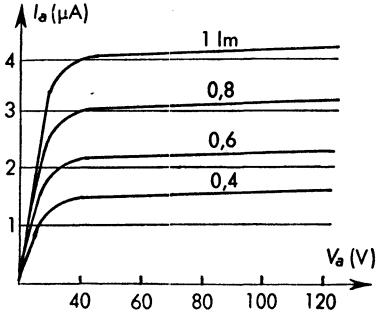


Fig. 1-149. — Caractéristique I_a (V_a) pour un photocathode Ag — C_s.

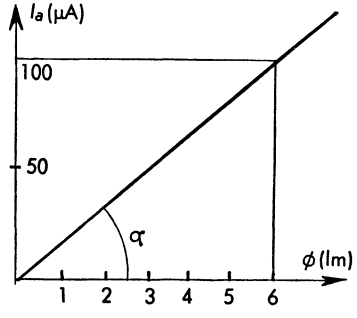


Fig. 1-150. — Variation de I_a en fonction du flux lumineux.

— *Sensibilité statique.*

La figure 1-150 montre que le courant I_a est proportionnel au flux lumineux.

La sensibilité statique $S = I_a/\Phi$ est constante et mesurée par la tangente de l'angle α.

Le courant I_a est limité par suite de la décomposition partielle de la surface sensible par l'effet thermique dû à l'éclairage intense.

— *Sensibilité dynamique.*

Les tubes photo-émissifs à vide reproduisent fidèlement les variations du flux lumineux jusqu'à plusieurs kHz (fréquence de modulation du faisceau). Ceci provient du fait que l'électron est expulsé très rapidement après l'arrivée du photon et que le temps de transit entre cathode et anode est très faible.

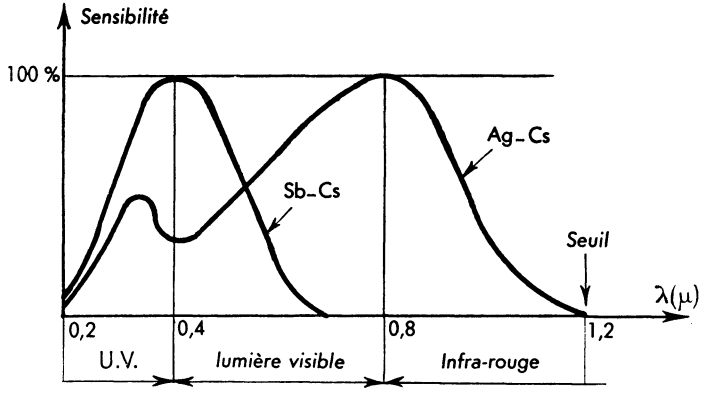


Fig. 1-151. — Caractéristiques spectrales.

— *Caractéristique spectrale.*

La figure 1-151 montre pour deux types de photocathodes la variation du courant en fonction de la longueur d'onde.

Le maximum de sensibilité peut être situé dans l'ultra-violet, la lumière visible ou l'infra-rouge suivant la nature de la photocathode.

De même le seuil de fréquence est fonction de la nature du matériau constituant la photocathode.

La diminution de la sensibilité lorsque la fréquence augmente provient du fait que les photons les plus énergétiques pénètrent plus profondément et ne libèrent pas d'électrons en surface.

— *Courant d'obscurité.*

Il est inférieur à 0,1 μA et il est pratiquement négligeable pour les tubes à cathode semi-transparente. Il est dû à la conduction par les parois et à l'émission thermo-électronique de la photocathode. On peut le réduire en refroidissant le tube.

— *Surface projetée.*

C'est la surface maximale de la photocathode projetée dans un plan perpendiculaire à l'axe du faisceau.

Elle varie de 0,2 cm^2 à 8 cm^2 suivant les modèles.

— *Tension d'anode.*

De quelques volts à 500 volts.

— *Température ambiante maximale.*

De 50 à 100 °C suivant les types.

c) Photo-cathodes.

Les trois principaux types utilisés actuellement sont :

— *Photocathode argent-césium* qui répond le plus loin dans l'infra-rouge (1,2 μ). Le maximum de sensibilité a lieu pour 0,8 μ.

— *Photocathode argent-bismuth-césium* dont le seuil de longueur d'onde est situé à 0,8 μ et le maximum de sensibilité à 0,53 μ environ.

— *Photocathode antimoine-césium* dont la sensibilité se rapproche le plus de celle de l'œil humain. Le seuil de fréquence a lieu pour 0,65 μ et le maximum de sensibilité pour 0,42 μ. Ce sont celles dont la sensibilité globale moyenne en lumière blanche est la plus élevée et peut atteindre 60 μA/lm.

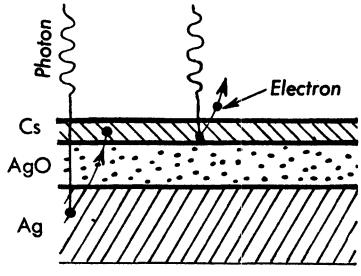


Fig. 1-152.
Photocathode. Argent-Césium.

Le rendement quantique des couches photosensibles est augmenté par la formation d'une couche d'oxyde semi-conducteur évitant que les électrons émis vers la surface par la couche d'argent sous-jacente ne retournent au sein du métal (voir fig. 1-152). Les électrons mis en réserve dans la couche superficielle sont libérés par l'arrivée d'autres photons.

d) Différents modèles.

— *Ancien tube* : La couche photosensible est déposée sur l'enveloppe du tube. La lumière passe à travers une fenêtre de l'ampoule et les électrons sont collectés par l'anode centrale en forme d'anneau (fig. 1-153).

— *Tube à cathode hémicylindrique* : L'anode est constituée par un fil coaxial. Cette nouvelle disposition a permis de réduire les courants de fuite (fig. 1-154).

— *Tube à cathode perforée* : Ce modèle est utilisé lorsque le tube doit réagir à la lumière en provenance de tous les azimuts (fig. 1-155).

— *Tube à cathode plate-circulaire* : L'anode est constituée par un treillis. Cette disposition permet la réduction des dimensions et est utilisée lorsque le faisceau est circulaire. La capacité entre anode et cathode est plus élevée que dans les modèles précédents (fig. 1-156).

— *Tube à cathode transparente* : La couche très mince est déposée directement sur le verre de l'ampoule, ce qui permet de réduire encore les dimensions dans le plan de la cathode. Les cathodes transparentes présentent une sensibilité relativement plus élevée pour les grandes longueurs d'ondes (fig. 1-157).

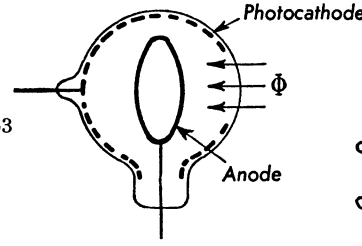
— *Tube à contacts annulaires à cathode transparente* : C'est un tube miniature à cathode transparente césium sur antimoine (fig. 1-158).

e) Fabrication.

Elle doit être extrêmement soignée d'une part parce que la couche photosensible est très fragile (quelques dizaines de millimicrons) et d'autre

part parce que le césium a une très grande activité chimique nécessitant l'élimination de toutes traces d'impuretés.

Fig. 1-153



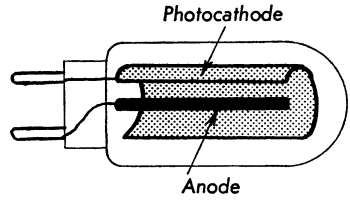
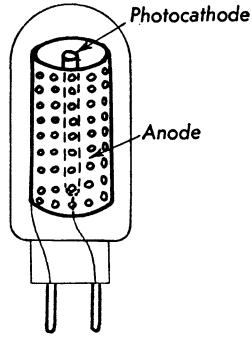


Fig. 1-154

Fig. 1-155



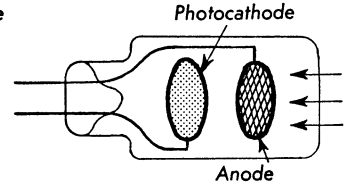


Fig. 1-156

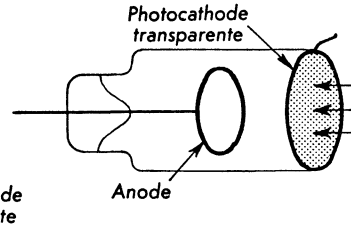
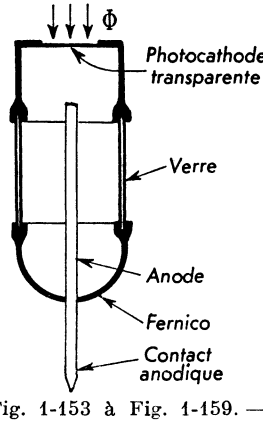


Fig. 1-157

Fig. 1-158



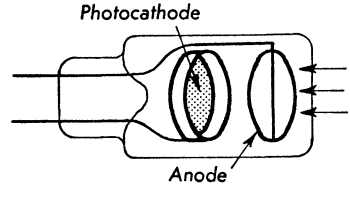


Fig. 1-159

Fig. 1-153 à Fig. 1-159. — Tubes photo-électriques.

— *Préparation du césium.*

Etant donné sa difficulté d'obtention on préfère le préparer dans le vide de l'ampoule de la façon suivante :

Du bichromate de césium est mélangé avec du silicium et enfermé dans une coupelle en nickel. Pendant la fabrication on chauffe en H.F., le silicium réduit le bichromate et la vapeur de césium se dégage dans l'ampoule.

— *Tubes à photocathode argent-césium.*

Pour les tubes à cathode opaque les principales opérations sont les suivantes :

— introduction des électrodes,
— pompage suivi d'un étuvage à 400 °C,
— formation de la couche d'oxyde d'argent par décharge électrique entre les électrodes,
— pompage de l'oxygène restant et nouvel étuvage,
— flash de la capsule à césium,
— application d'une D.D.P. 100 V entre électrodes et d'un faisceau lumineux pour formation de la couche photosensible,
— scellement du queusot et étuvage jusqu'à ce que le maximum de sensibilité soit atteint,

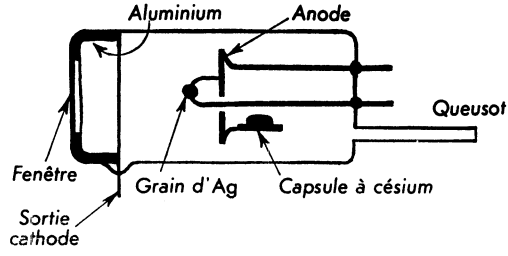


Fig. 1-160. — Tube photo-émissif.

— dans le cas de cathode semi-transparente les opérations sont sensiblement les mêmes. On procède à l'évaporation d'argent pendant le pompage par chauffage (effet Joule) d'un grain d'argent fixé sur un fil de tungstène (fig. 1-160).

— *Tubes à photocathode antimoine-césium.*

Pour les cathodes opaques :

— évaporation sous vide du support de la couche photosensible en aluminium,
— évaporation d'antimoine à partir d'un grain fixé sur fil de tungstène et chauffé par effet Joule pendant le pompage,
— flash de la capsule à césium,
— oxydation de la couche par introduction d'oxygène,
— pompage et scellement.

Comme précédemment plusieurs étuvages sont nécessaires en cours de fabrication.

Pour les cathodes semi-transparentes :

— Il faut déposer au préalable sur la paroi interne de la fenêtre une pellicule de manganèse ou d'étain car la couche complexe d'antimoine césium ($Sb\ Cs_3$) est peu conductrice.

f) Applications.

Elles peuvent être classées en deux catégories :

• Celles où le tube agit sur un appareil de mesure ou de reproduction en fonction du flux lumineux qu'elle reçoit.

• Celles où le tube déclenche, par l'intermédiaire d'un relais, un organe mécanique lorsque la variation d'éclairement est supérieure à une valeur limite.

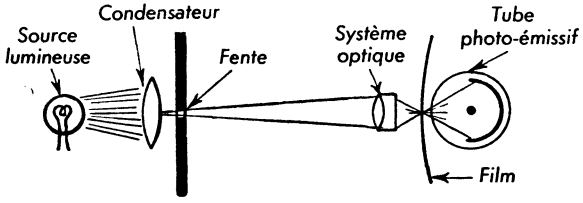


Fig. 1-161. — Cinéma sonore.

— *Photométrie* : La proportionnalité du courant au flux lumineux et la grande stabilité des tubes photo-émissifs permet de construire des photomètres de précision. Leur inconvénient est de nécessiter un amplificateur soigné et une alimentation stabilisée.

Des utilisations analogues sont faites en colorimétrie et spectrophotométrie.

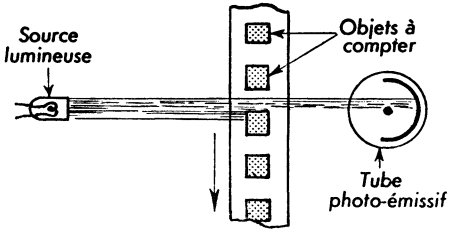


Fig. 1-162. — Dispositif de comptage.

— *Cinéma sonore* : La lecture des pistes sonores est réalisée suivant le principe de la figure 1-161. Les pistes inscrites sur le film sont du type à densité variable ou à surface variable. Dans les deux cas l'amplitude du courant, dans le tube photo-émissif transformé en signal sonore, est proportionnelle à l'opacité de la piste sonore.

— *Dispositifs de comptage* : On utilise la coupure d'un faisceau lumineux par l'objet à compter suivant le schéma de la figure 1-162. Etant donné l'installation compliquée (alimentation, amplificateur) elles ne seront utilisées que si la sensibilité doit être élevée ou la fréquence de comptage grande du fait de leur faible inertie.

— *Autres applications* : Déclenchement d'appareils de sécurité, contrôle de flammes, détection des fumées, alarmes d'incendie, contrôle et réglage d'éclairage.

2° Tubes photo-émissifs à gaz.

a) Principe.

Ce sont des tubes photo-émissifs dans lesquels on introduit un gaz inerte (hélium, néon, argon) de façon à augmenter la sensibilité par ionisation (décharge non autonome). La pression optimale des tubes à argon est de 0,2 mm Hg.

Les modèles sont ceux étudiés pour les tubes photo-émissifs à vide. L'un d'eux est représenté à la figure 1-159.

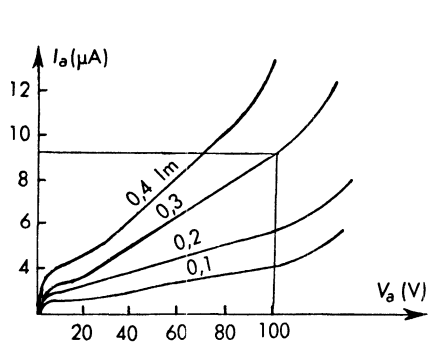


Fig. 1-163. — Caractéristiques I_a (V_a).

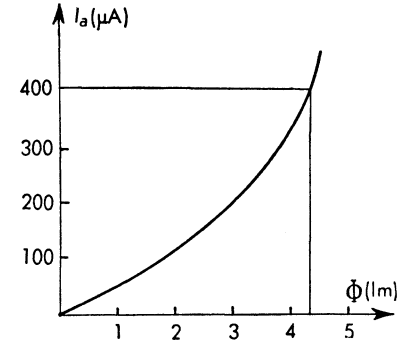


Fig. 1-164. — Caractéristiques courant-lumière.

Tubes photo-émissifs à gaz.

b) Caractéristiques.

— *Caractéristique* I_a (V_a), figure 1-163.

A partir d'une certaine valeur de *Va*, le courant ne se stabilise plus comme dans les tubes photo-émissifs à vide, mais augmente très rapidement.

Si *Va* croît au-dessus d'une valeur limite, l'ionisation devient très importante et le bombardement ionique de la cathode provoque une émission intense d'électrons. On atteint la décharge disruptive qui détruit le tube ($V_a \leqslant 90$ V).

— *Caractéristique courant-lumière*, figure 1-164.

Le courant n'est plus proportionnel au flux lumineux, la non linéarité dépendant d'ailleurs fortement de la géométrie du tube.

— *Sensibilité dynamique.*

Elle est faible car le déplacement des ions est beaucoup plus lent que celui des électrons.

Autres caractéristiques : Elles sont semblables à celles des tubes photo-électroniques à vide.

c) Utilisations.

Les inconvénients : manque de linéarité, inertie en H.F. (modulation de flux inférieure à 6 000 Hz) en limitent les emplois.

De plus le phénomène de fatigue provoque une diminution de la sensibilité avec le temps. Ceci est dû au bombardement ionique de la photocathode.

Par contre leur sensibilité est dix fois supérieure à celle des tubes photo-électroniques à vide (200 à 250 μA/lm). Les applications sont analogues (sauf en photométrie). Elles sont sérieusement concurrencées par les cellules photo-électriques étudiées ci-après.

3° Photomultiplicateurs.

a) Principe.

Lorsque l'on désire amplifier dans de très fortes proportions des courants très faibles émis par une photocathode on utilise un multiplicateur d'électrons dans lequel le courant initial est amplifié par une ou plusieurs dynodes successives.

Une dynode est une électrode dont le rôle essentiel est de fournir une émission secondaire.

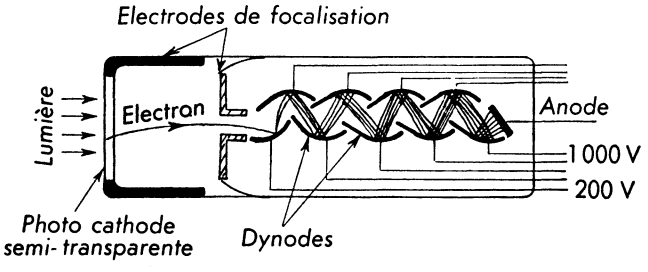


Fig. 1-165

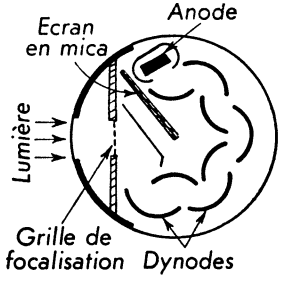


Fig. 1-166.

Photomultiplicateurs.

b) Description.

Quelle que soit la disposition des éléments (fig. 1-165, ou fig. 1-166) un photomultiplicateur comprend les éléments suivants :

— *photocathode* : semi-transparente généralement à couche de césium sur antimoine déposée sur une fenêtre polie optiquement (verre B 40 ou quartz),

— *électrodes de focalisation* : le réglage de leur potentiel permet de concentrer le faisceau d'électrons émis par la photocathode,

— *dynodes* : la forme la plus courante est celle représentée sur les figures (1). Les matériaux utilisés doivent avoir un taux d'émission secondaire élevé tout en étant exempt d'inertie et stables dans le temps.

On utilise un alliage d'argent à 2 % de magnésium ou de cuivre à 2 % de béryllium. Leur taux d'émission secondaire est environ 4 pour des électrons accélérés sous une centaine de volts.

(1) Certains tubes comportent des dynodes sous forme de grilles placées les unes derrière les autres.

Les tubes comportent dix à vingt dynodes, chacune étant portée à un potentiel supérieur à celui de la précédente.

— *Anode* : plane en nickel.

— Le tube comporte par ailleurs une capsule à césium et un dégazeur.

c) Propriétés.

Le gain obtenu pour n dynodes est : $G = \delta^n$

δ : taux d'émission secondaire.

Les photomultiplicateurs courants permettent d'obtenir facilement une amplification de 1 000 000. Leur courant d'obscurité est faible. On peut mesurer des flux lumineux cent fois plus faibles qu'avec une cellule suivie d'un amplificateur classique. Ceci provient du fait que le photomultiplicateur est un amplificateur d'intensité alors que les tubes à vide sont des amplificateurs de tension dans lesquels la résistance de charge est le siège d'une tension de bruit qui limite l'amplification. La sensibilité globale moyenne peut atteindre plusieurs centaines d'A/lm.

d) Applications.

— *Photométrie* : Mesure de flux lumineux faibles, intensité des raies spectrographiques, brillance des étoiles.

— *Flying-spot* : C'est un procédé de lecture de films pour télévision. Les images sont balayées par le spot d'un tube cathodique. La lumière agit ensuite sur un photomultiplicateur après avoir traversé le film.

— *Compteurs à scintillations* (fig. 1-167) : Ils constituent l'application la plus importante des photomultiplicateurs.

La scintillation est une luminescence quasi ponctuelle de faible durée (environ 10^{-6} s au moins) provoquée par l'impact d'une particule de grande énergie (rayons α, β ou γ).

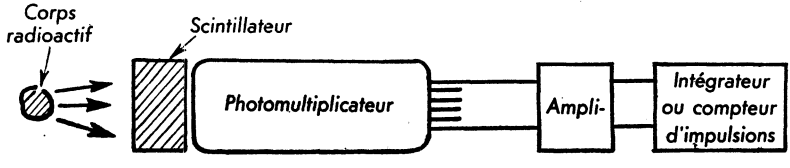


Fig. 1-167. — Compteur à scintillations.

Le scintillateur est un disque en polystyrène comprenant du p-terphényl (agent fluorescent) et du tétraphényl butadiène (adaptation du spectre d'émission) sensible aux divers rayonnements. Le disque est en plexiglas revêtu de sulfure de zinc (rayons α), en polystyrène au sulfure de zinc (neutrons rapides) ou en iodure de sodium activé au thallium (rayons γ).

Chaque corpuscule tombant sur le scintillateur émet un ou plusieurs photons qui excitent la photocathode du photomultiplicateur. Les impulsions de courant qui en résultent agissent sur un compteur ou un intégrateur.

Les compteurs à scintillations concurrencent avantageusement les compteurs de Geiger pour les raisons suivantes :

— Ils peuvent compter plus d'un million de particules par seconde (quelques milliers pour un compteur de Geiger).

— Ils ont une plus grande stabilité dans le temps (tube à vide et non tube à gaz).

— La stricte proportionnalité du courant de sortie à l'énergie du rayonnement les font employer en spectrométrie. Utilisations dans les recherches nucléaires et toutes techniques qui font appel aux isotopes radio-actifs.

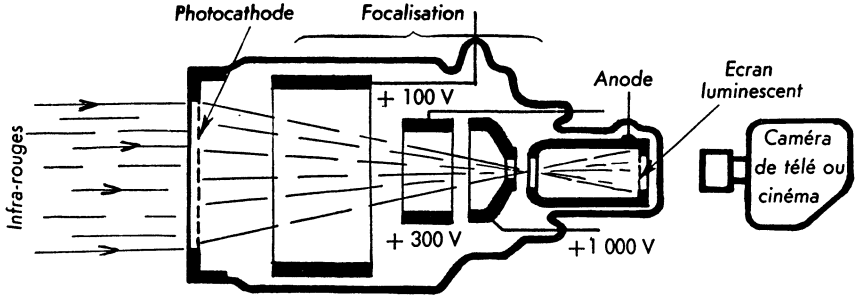


Fig. 1-168. — Tube à image.

4° Tubes à image.

a) Principe.

Lorsque les radiations à observer sont très peu brillantes ou en dehors du spectre visible (rayons X, ultra-violets, infra-rouges), on utilise un tube à image dont le but est d'augmenter la brillance de l'image (intensificateur d'images) ou de la rendre visible (convertisseur d'images).

b) Description (fig. 1-168).

— *Photocathode* : Elle est du type semi-transparente. La nature de la couche dépend du rayonnement incident. Ce sera par exemple une couche argent-césium pour le rayonnement infra-rouge.

— *Optique électronique* : Le dispositif est constitué de plusieurs cylindres portés à des potentiels croissant par rapport à la photocathode ayant pour but de focaliser le faisceau et de former une image électronique sur un écran.

— *Ecran* : Il est formé d'une couche luminescente dont la nature dépend de l'observation (visuelle, photo). (Voir chapitre IV). Il est aluminisé pour améliorer la brillance et le contraste.

c) Applications.

Observation de scènes nocturnes « éclairées » à l'aide d'un projecteur infra-rouge ($0{,}8\ \mu < \lambda < 1{,}2\ \mu$).

Vision nocturne d'objets rayonnant naturellement des infra-rouges (pots d'échappement de moteurs, gaz de combustion...).

Intensification d'images de rayons X permettant de n'utiliser que des doses faibles de rayons X. Dans ce cas le tube comporte contre la photocathode une couche de platino-cyanure de baryum qui devient luminescente sous l'action des rayons X.

5° Tubes analyseurs de télévision (1).

a) Principe.

Ce sont des tubes électroniques qui traduisent, sans l'intervention de moyens mécaniques, une image optique en signaux électriques de télévision.

L'image est décomposée en 625 ou 819 lignes comportant chacune 600 à 800 points élémentaires. L'image optique est transformée en image électronique sous forme de charges électriques élémentaires durables, les charges étant proportionnelles à la luminosité des points correspondants de l'image optique. Le courant de décharge produit par l'analyse de l'image sera proportionnel à l'intensité lumineuse de chaque point de l'image optique.

Pour transmettre le mouvement il suffit que l'analyse soit suffisamment rapide et qu'un nombre suffisant d'images soit transmis chaque seconde (25 images par seconde).

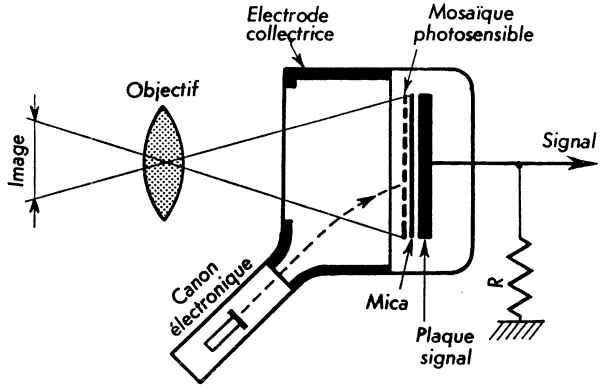


Fig. 1-169. — Iconoscope.

b) Différents types.

Iconoscope (fig. 1-169).

C'est l'ancêtre des tubes analyseurs modernes qui a été mis au point en 1936 par Zworykin.

L'image optique est formée au moyen d'un objectif sur une cible constituée par une feuille de mica à l'arrière de laquelle on a déposé une couche d'aluminium appelée plaque signal. Sur l'avant, une mosaïque photosensible est obtenue par craquelage d'une couche d'argent qui est ensuite

(1) Voir aussi Vidicon, page 110.

oxydée et recouverte de césium suivant la technique exposée précédemment. Tous les grains microscopiques (0,1 mm environ) constituent autant de cathodes argent-césium isolées l'une de l'autre.

Les photo-électrons émis par chaque élément photosensible sont attirés par une électrode collectrice déposée sur la paroi interne du tube. Chaque grain se charge ainsi positivement et constitue avec la plaque signal un micro-condensateur. Il se décharge lorsque chaque élément récupère les électrons perdus aux dépens du faisceau cathodique émis par le canon à électrons balayant la mosaïque. Le courant traversant la résistance R est proportionnel à l'éclairement de chaque point de l'image.

La sensibilité de l'iconoscope, assez faible, est due au fait que l'isolement entre grains n'est pas parfait, provoquant des fuites électriques.

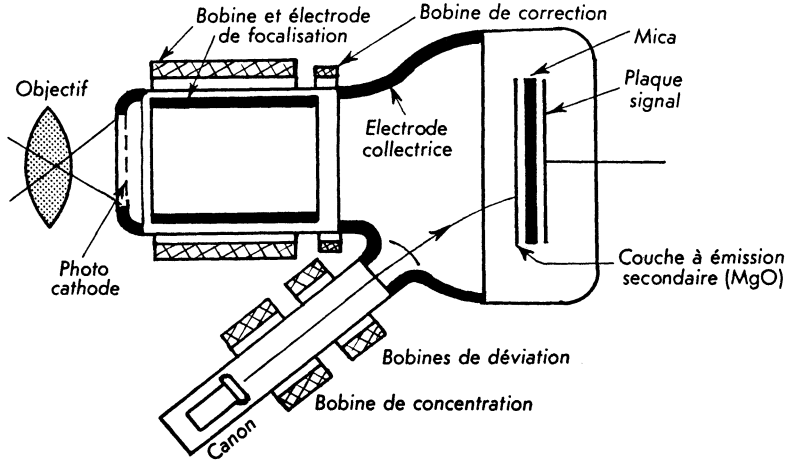


Fig. 1-170. — Super-iconoscope.

Super-iconoscope ou photicon (fig. 1-170).

Dans ce tube les fonctions de sensibilité à la lumière et d'accumulation des charges sont séparées.

L'image optique est formée sur une photocathode semi-transparente du type antimoine-césium. Les photo-électrons sont focalisées sur une cible constituée d'une couche de magnésie continue isolante et ayant un taux d'émission secondaire assez élevé ($\delta \approx 4$). Les électrons secondaires arrachés sont recueillis par une électrode collectrice déposée sur la paroi interne de l'ampoule. La charge positive qui en résulte en chaque région de la magnésie est proportionnelle à l'éclairement du point correspondant de l'image optique. Le reste du processus est identique à celui de l'iconoscope.

La sensibilité du photicon, bien que moyenne, est 10 fois supérieure à celle de l'iconoscope. Néanmoins il subsiste dans ce type de tube les inconvénients suivants :

— Effet de tache due à l'inégale répartition de l'émission secondaire, car le niveau de tension de la surface n'est pas le même partout.

— Effet de trapèze dû à l'inclinaison du canon électronique sur l'axe optique.

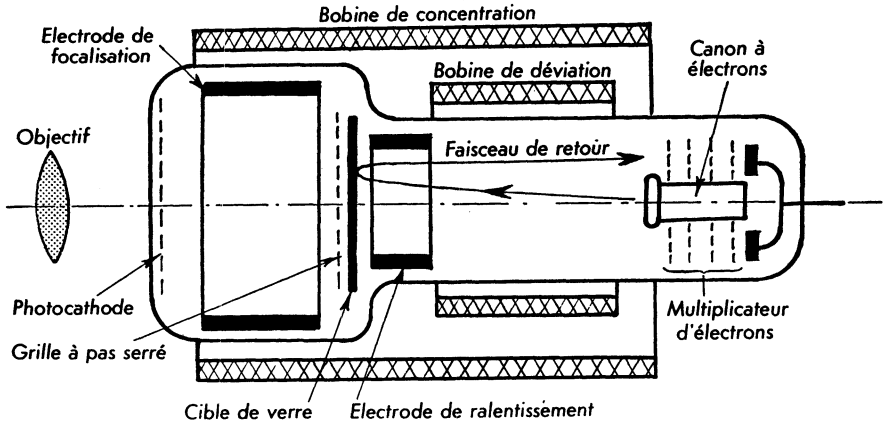


Fig. 1-171. — Image-Orthicon.

Orthicon (fig. 1-171).

L'image électronique parvenant de la photocathode est focalisée sur une grille à pas très serré placée à 1 ou 2 mm d'une cible constituée par un verre spécial très mince (10 μ). La grille a pour but de capter les électrons secondaires dès leur émission, évitant ainsi la formation de la tache.

Les charges positives développées sur la plaque de verre sont neutralisées par le faisceau électronique venant de l'arrière. Les électrons en excédent sont repoussés sous forme d'un faisceau de retour collecté par un multiplicateur d'électrons qui amplifie le courant 1 000 fois environ.

Le courant est d'autant plus intense que le point correspondant de l'image optique est moins éclairé.

La sensibilité de l'orthicon est 10 à 20 fois supérieure à celle du photicon. Les effets de tache et de trapèze sont supprimés.

c) Applications.

Indépendamment des prises de vues en studio, les analyseurs de télévision sont utilisés chaque fois que l'on désire observer à distance une scène inaccessible, dangereuse ou ne permettant pas un nombre suffisant d'observateurs :

— Trains de laminoirs à chaud.
— Gares de triage.
— Centrales atomiques.
— Opérations chirurgicales.
— Enseignement, etc.

C - Effet photoconductif.

1° Cellules photoconductives.

a) Principe.

Les cellules photoconductives (ou photorésistives) contiennent des substances dont la conductivité varie avec l'éclairement. Leur résistance ohmique change nettement en fonction de l'intensité et de la longueur d'onde de la radiation. Cette propriété est particulière aux semi-conducteurs.

Si on insère dans le circuit (fig. 1-172) une résistance on obtient à ses bornes une différence de potentiel proportionnelle au courant produit par l'éclairement de la cellule.

Les photons libèrent au sein du semi-conducteur des paires électrons-trous (1). Le nombre d'électrons qui traversent la cellule de la cathode à l'anode est d'autant plus grand que la durée de vie des trous est plus élevée. Le rôle joué par les impuretés est très important (activateurs tels que l'argent, le cuivre).

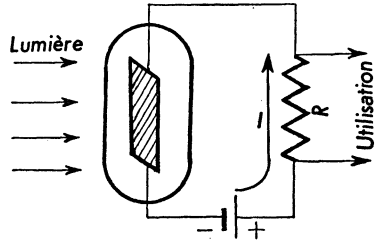


Fig. 1-172.
Cellule photoconductrice.

b) Matériaux.

Le plus ancien utilisé est le sélénium.

Depuis quelques années des substances nouvelles sont utilisées ayant soit des sensibilités des dizaines de milliers de fois supérieures à celles du sélénium, soit une sensibilité spectrale différente.

Le tableau suivant indique les substances les plus utilisées. Le sélénium, le sulfure de thallium et le sulfure de cadmium sont sensibles à la lumière visible. Le sulfure de cadmium est d'autre part extrêmement sensible aux rayons X et aux rayonnements corpusculaires.

TABLEAU 1-8. — SUBSTANCES POUR CELLULES PHOTOCONDUCTIVES

	λ pour sensibilité max	Seuil de λ	Sensibilité moyenne
Sélénium	0,4 μ	0,8 μ	1 mA/lm
Sulfure de thallium	0,9 μ	1,3 μ	10 mA/lm
Sulfure de cadmium	0,52 μ	0,6 μ	10 A/lm
Sulfure de plomb	2,5 μ	3,5 μ	3 mA/lm

(1) Voir obtention des trous ou lacunes au deuxième chapitre.

Les cellules au sulfure de thallium remplacent souvent celles au sélénium car elles sont plus sensibles et ont une réponse dynamique meilleure.

Le sulfure de cadmium donne une sensibilité 10 000 fois supérieure à celle du sélénium et peut être utilisé jusqu'à 10 000 Hz.

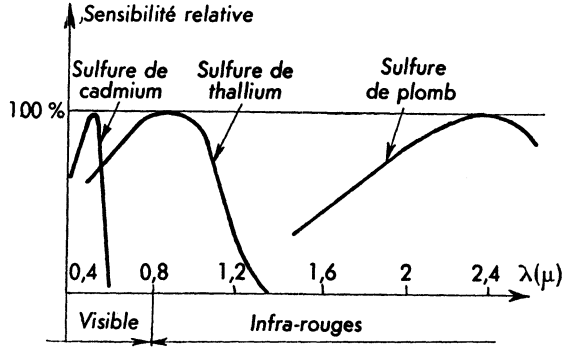


Fig. 1-173. — Courbe de sensibilité.

Les composés de plomb sont sensibles dans l'infra-rouge : Le sulfure de plomb jusqu'à 3,5 μ, le séléniure de plomb et le tellure de plomb jusqu'à 7 μ, ces derniers étant refroidis à la neige carbonique (— 80 °C) pour étendre leur spectre dans l'infra-rouge.

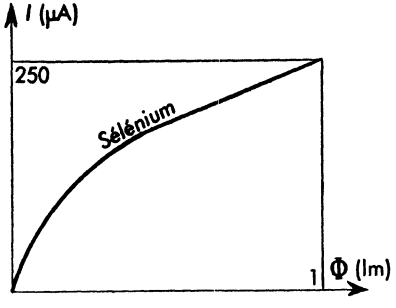


Fig. 1-174.
Caractéristiques spectrales.

Le choix et le dosage des activateurs (argent, cuivre) permet de modifier dans le sens désiré les caractéristiques spectrales.

c) Caractéristiques d'utilisation.

Ce sont comme pour les tubes photo-émissifs les sensibilités statique et dynamique, la caractéristique spectrale, le courant d'obscurité, la surface sensible, la tension d'alimentation, la température ambiante maximale.

Les figures 1-173 et 174 montrent pour divers types de cellules photo-émissives les courbes de sensibilité et la caractéristique spectrale. On remarque que le courant photo-électrique n'est pas proportionnel au flux lumineux (phénomène de fatigue).

d) Différents modèles.

Les cellules au sélénium (fig. 1-176) sont obtenues en condensant sous vide de la vapeur de sélénium dans un sillon réalisé sur une pellicule d'or ou de platine déposée sur plaque de verre. Le courant pour passer d'une électrode à l'autre doit traverser le ruban de sélénium.

La figure 1-175 montre une cellule au séléniure de cadmium, le sillon étant réalisé dans une couche de carbone colloïdal (aquadag) sous ampoule de verre.

La figure 1-177 représente une cellule au sulfure de cadmium placée dans une ampoule miniature. Les électrodes de cuivre s'interpénètrent.

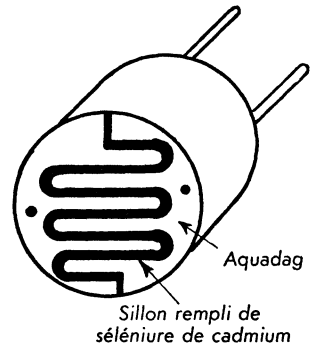


Fig. 1-175

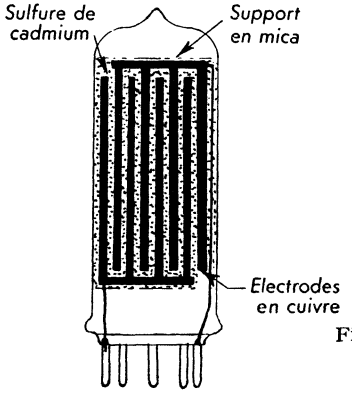


Fig. 1-177

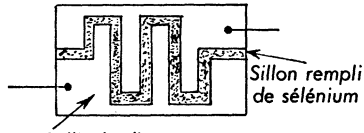


Fig. 1-176

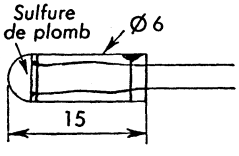


Fig. 1-178

Fig. 1-175 à Fig. 1-178. — Cellules photoconductrices.

Les cellules au sulfure de plomb les plus fréquemment utilisées ont une surface sensible carrée de sulfure de plomb déposé entre deux bandes d'aquadag constituant les électrodes. La zone sensible est placée soit à l'extrémité de l'ampoule, soit sur la surface latérale (fig. 1-178).

e) Fabrication.

Elle est fonction de la couche sensible utilisée. A titre d'exemple les opérations nécessaires à la fabrication d'une cellule au sulfure de cadmium sont les suivantes :

— Préparation de cristaux de sulfure de cadmium à partir de cadmium métallique et d'hydrogène sulfuré.

— Chauffage d'un mélange de poudre de sulfure de cadmium et d'activateurs.

— Broyage et chauffage répétés ayant pour but la diffusion des activateurs dans le sulfure.

— Chauffage de la poudre précédente et de sulfure de cadmium à 600 °C pendant plusieurs heures. Le mélange stœchiométrique permet d'obtenir la composition désirée.

— Les électrodes métalliques sont déposées ensuite sur la pastille de sulfure de cadmium activé par projection au pistolet.

— Montage dans une ampoule fermée après avoir fait le vide.

f) Applications.

Les cellules photoconductives ont des applications importantes grâce à leur volume réduit, à la simplicité de l'appareillage auxiliaire nécessaire et aux courants de sortie élevés qu'elles fournissent.

— Commande automatique de portes, d'escaliers roulants.
— Commande d'éclairage.
— Contrôle de flammes et fumées.
— Systèmes de comptage.

2° Analyseur de télévision : « Vidicon ».

a) Principe.

Le « Vidicon » est un tube analyseur de télévision qui a pour but de traduire une image optique en signaux électriques de télévision en utilisant l'effet photoconductif.

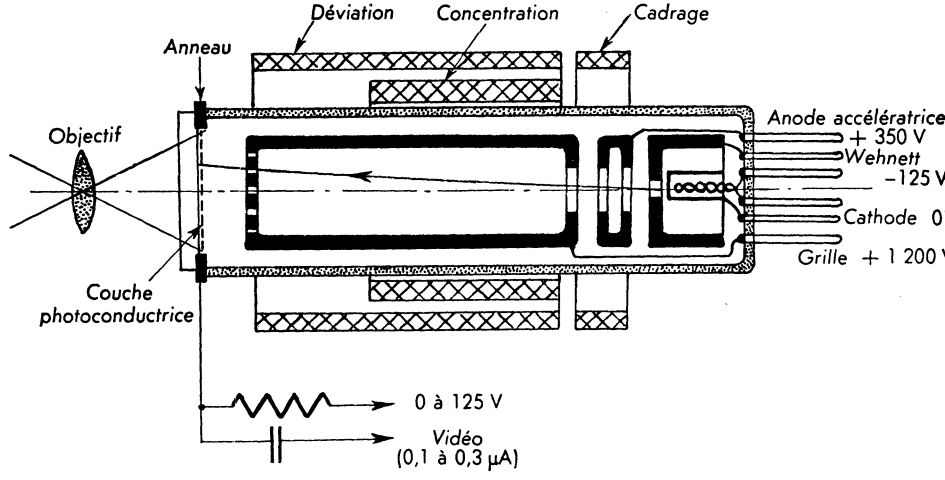


Fig. 1-179. — Vidicon.

L'image est projetée au moyen d'un système optique sur le revêtement photoconducteur déposé sur une plaque métallique transparente dite « plaque de signal ». La résistance de chaque grain de la couche photoconductive diminue lorsque l'intensité lumineuse qui le frappe augmente. La plaque de signal est polarisée positivement et un faisceau cathodique à faible vitesse balaye la couche photoconductive. Les électrons du faisceau traversent la couche et sont attirés par la plaque de signal. Le courant qui en résulte est d'autant plus grand au point considéré que la luminosité est plus importante.

Le signal est recueilli aux bornes d'une résistance placée en série dans le circuit de la photocathode.

b) Description (fig. 1-179).

— *Photocathode* : Elle est constituée par un revêtement de trisulfure d'antimoine (sensibilité spectrale se rapprochant de celle de l'œil) déposé sur une pellicule métallique conductrice et transparente.

— *Canon à électrons* : Il comprend une cathode à oxydes à chauffage indirect, une électrode de contrôle, une électrode d'accélération, une électrode de focalisation et une grille à mailles fines portée au même potentiel que l'électrode précédente. La grille a pour but de créer un champ retardateur uniforme, afin que le faisceau ralenti tombe perpendiculairement sur la couche et qu'il ne provoque pas d'émission secondaire.

— *Bobines* : La concentration du faisceau est obtenue par l'action combinée du champ électrostatique de l'électrode de focalisation et d'un champ magnétique uniforme produit par une bobine ou un aimant permanent.

D'autres bobines permettent d'une part le centrage du faisceau et d'autre part sa déviation.

c) Fabrication.

Les opérations principales sont les suivantes :

— évaporation du tri-sulfure d'antimoine;

— scellement de l'ampoule sur le pied. Pendant cette opération la couche photosensible est protégée par de l'hélium;

— étuvage prolongé (4 h à 400 °C);

— formation de la cathode;

— flash du dégazeur et scellement du queusot.

d) Applications.

La grande sensibilité permet la fabrication des tubes analyseurs de petites dimensions (certains n'ont guère plus de 1 cm de diamètre) surtout destinés à la télévision industrielle ou au télécinéma.

La définition actuelle ne dépasse guère 500 à 600 lignes du fait du traînage.

D - Effet photovoltaïque.

1° Cellules à couche d'arrêt ou photopiles.

a) Principe.

Une cellule au sélénium comprend :

— Une plaque support en acier doux.

— Un semi-conducteur constitué ici par du sélénium.

— Une électrode semi-transparente sous forme d'une pellicule très mince d'or ou de platine.

Au contact semi-conducteur-métal existe une couche d'arrêt qui provient du fait que les deux matériaux possèdent des potentiels d'extraction différents (1).

Les photo-électrons libérés dans le semi-conducteur traversent la couche d'arrêt dans le sens semi-conducteur métal. (Sens contraire de celui prévu pour le fonctionnement en redresseur). On obtient une cellule dite à *effet avant*, effet dû à la présence de l'électrode translucide.

La force électromotrice qui apparaît au contact entre le métal et le semi-conducteur constitue la manifestation de l'effet photo-électrique.

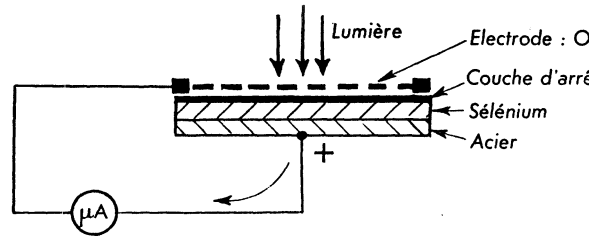


Fig. 1-180. — Cellule photovoltaïque.

b) Différents types.

Cellules cuivre-oxyde de cuivre.

Ce furent les premières cellules photovoltaïques. Elles sont abandonnées au profit des cellules au sélénium qui sont moins sensibles aux variations de température et plus stables dans le temps.

Cellules au sélénium (fig. 1-180).

Elles se composent d'une plaque d'acier doux sur laquelle est déposée une couche de sélénium de 0,1 mm environ d'épaisseur. Elle est recouverte d'une mince pellicule d'or ou de platine transparente. Un anneau de contact en argent appelé contre-électrode est appliqué sur le pourtour de la cellule.

Elles sont protégées par un vernis spécial transparent.

Différents modèles :

— Cellules miniatures (fig. 1-181). Elles ont un diamètre inférieur à 10 mm et comportent un ou plusieurs points collecteurs.

— Cellules normales (fig. 1-182). De forme rectangulaire ou circulaire elles possèdent un anneau de contact et sont généralement enfermées dans un boîtier protecteur (2) (plexiglas, caoutchouc synthétique) possédant des broches ou des vis de raccordement.

— Cellules multiples (fig. 1-183). Elles comportent un certain nombre d'éléments en série imprimés sur un support isolant et elles permettent d'obtenir des tensions relativement élevées.

(1) Voir deuxième chapitre.

(2) Les matériaux constituant le boîtier ne doivent pas émettre de vapeurs nocives telles que chlore, soufre, formol.

Une cellule comportant 144 éléments dite « œil de mouche » permet de recueillir une tension aux bornes atteignant 80 volts.

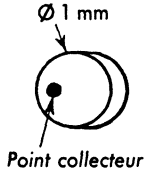


Fig. 1-181.

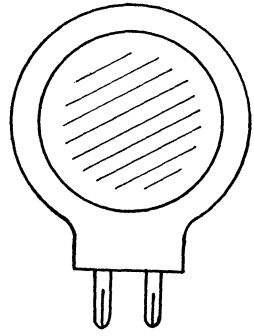


Fig. 1-182.
Cellules photovoltaïques.

Fig. 1-183.

Cellules au sulfure de plomb.

Elles ont une très grande sensibilité et leur caractéristique spectrale couvre l'étendue du spectre infra-rouge.Elles sont surtout utilisées en astronomie.

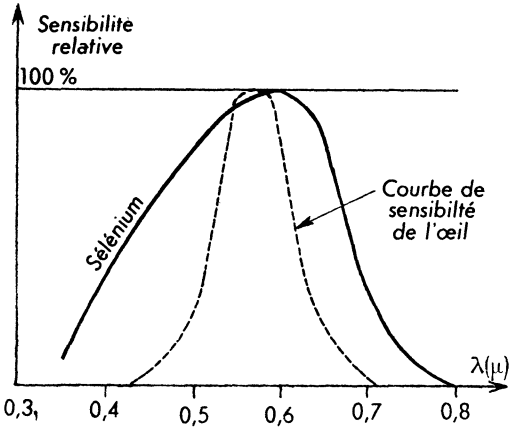


Fig. 1-184. — Caractéristiques spectrales d'une photopile au sélénium.

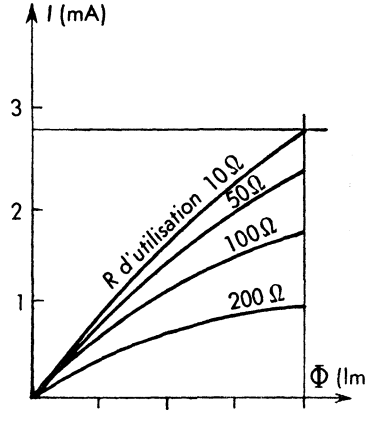


Fig. 1-185. — Caractéristiques courant-lumière d'une photopile au sélénium.

c) Caractéristiques.

Caractéristique courant-lumière (fig. 1-185).

Les courbes d'intensité débitée en fonction du flux lumineux s'infléchissent d'autant plus que la valeur de la résistance du circuit d'utilisation

est plus élevée, et que la surface de la cellule est plus grande. La sensibilité des photopiles au sélénium varie de 140 à 600 μ A/lm.

Caractéristique spectrale (fig. 1-184).

Les cellules au sélénium présentent un maximum de sensibilité pour une longueur d'onde voisine de celle de sensibilité maximale de l'œil humain.

Sensibilité dynamique.

Elle est très bonne jusqu'à 1 000 Hz mais tombe rapidement pour s'annuler aux environs de 10 kHz. Cette diminution du débit avec la fréquence du flux lumineux provient de la capacité élevée des cellules.

Température.

La sensibilité des photopiles au sélénium diminue avec la température. Son influence est d'autant plus faible que la résistance du circuit d'utilisation est plus petite.

Pour éviter toute détérioration il est recommandé de ne pas dépasser 70 °C.

Fatigue.

Les cellules à couche d'arrêt sont l'objet d'une fatigue temporaire par exposition à la lumière.

Après cessation de l'éclairement la cellule recouvre progressivement sa sensibilité initiale.

De plus les cellules sont soumises à un effet de vieillissement diminuant légèrement la sensibilité avec le temps surtout si elles subissent des éclairements trop intensifs, ce qui nécessite un réétalonnage dans le cas d'utilisation comme photomètres.

d) Fabrication.

La fabrication des cellules à couche d'arrêt au sélénium comprend :

— Fusion du sélénium sur le support en acier nettoyé et dépoli au jet de sable, à une température d'environ 175 °C.

— Recuit à 80 °C pour amener le sélénium à sa variété cristalline.

— Condensation ou pulvérisation de l'électrode.

— Pose de la contre-électrode et montage dans un boîtier.

Remarque : Une addition de 2 % environ de thorium, zirconium ou cérium au sélénium augmente la sensibilité.

e) Applications.

Ne nécessitant pas de source de tension, elles sont très faciles à utiliser et sont employées dans les appareils portatifs tels que luxmètres, posemètres.

Elles peuvent déclencher des relais à thyratron par excitation de la grille.

2° Photodiodes.

a) Principe.

Dans les photodiodes le contact métal semi-conducteur est remplacé par une jonction *n p* au germanium ou au silicium. Elles doivent être alimentées.

b) Description (fig. 1-186).

La micro-jonction est placée dans une enveloppe métallique protectrice qui sert de blindage. La lumière est concentrée sur la jonction à l'aide d'une lentille.

Leurs dimensions sont très petites.

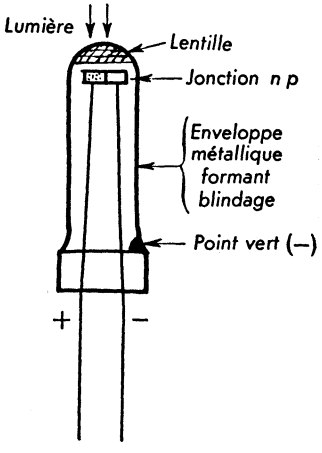


Fig. 1-186. — Photo-diode.

c) Caractéristiques.

Le rendement quantique de ces cellules est très élevé et peut atteindre 10 % alors qu'il n'est que de 1 % pour les cellules au sélénium.

Les cellules au silicium ont leur maximum de sensibilité dans le rouge (0,75 μ) et celles au germanium dans l'infra-rouge (1,5 μ).

Leur temps de réponse est faible (quelques dizaines de microsecondes). Leur sensibilité peut atteindre 500 μA/lm.

d) Applications.

Lecture de piste sonore de film, le signal fourni pouvant attaquer directement l'étage de puissance.

Commande de relais à thyratrons.

Piles solaires comportant plusieurs centaines d'éléments et permettant l'alimentation d'appareils portatifs, d'émetteurs pour satellites artificiels. Pour avoir une régularité de fonctionnement, les photodiodes débitent sur une batterie d'accumulateurs au cadmium-nickel.

3° Phototransistors.

Dans le phototransistor la lumière frappe le semi-conducteur au voisinage de la base, et le courant produit est amplifié par l'effet transistor.

E - Code.

Le code européen utilisé pour la désignation des tubes et cellules photoélectriques est résumé dans le tableau suivant :

TABLEAU 1-9. — CODE DES TUBES ET CELLULES PHOTO-ÉLECTRIQUES

TUBES PHOTO-ÉLECTRIQUES

1er chiffre	2e chiffre	1re lettre	2e lettre	3e lettre
Culot	Numéro de série	Photocathode	Remplissage	
2 locktal 3 octal 5 culot spécial 8 noval 9 miniature		A : césium/Sb C : césium/Ag	G : gaz V : vide	P : photo-multiplicateurs

CELLULES PHOTO-ÉLECTRIQUES

1re lettre	2e lettre	3e lettre	1re chiffre	2e chiffre
Chauffage	Type	Repère	Culot	Numéro de série
O : absence de chauffage	R : photoconductives A : diode Ge (ou transistor *pnp*) B : diode Si ou transistor (*pnp*) C : transistor *npn*	P : cellule photo-électrique à semi-conducteur	6 subminiature 7 subminiature 9 miniature	

Exemples :

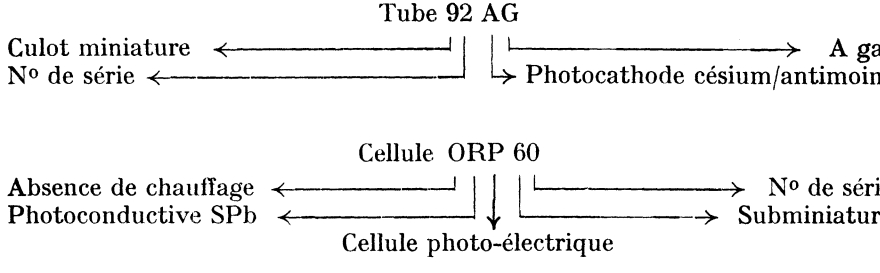


TABLEAU I 10. — COMPARAISON DES DIVERS TUBES ET CELLULES PHOTO-ELECTRIQUES

		λ au max. de sensibilité (μ)	Seuil de λ (μ)	Sensibilité statique moyenne	Fréquence de modulation maximale du flux lumineux	Utilisations
TUBES PHOTOÉMISSIFS A VIDE	Ag-Cs	0,8 (R)	1,2	30 μA/lm	1 MHz	Photométrie Cinéma-Comptage Sécurité-Alarme Contrôle d'éclairage Analyseurs de télévision
	Ag-Bi-Cs	0,53 (B)	0,8	40 μA/lm		
	Sb-Cs	0,4 (V)	0,65	50 μA/lm		
T. PHOTOÉMISSIFS A GAZ	id.	0,3 à 1	0,5 à 1,5	200 μA/lm	1 kHz	idem sauf photométrie
CELLULES PHOTOCONDUCTIVES	Se	0,4 (V)	0,8	1 mA/lm	200 Hz Certaines cellules jusqu'à 10 kHz	Commande de portes Commande d'escaliers Contrôle d'éclairage Contrôle de flamme Comptage-Vidicon (Cd S sensibles aux rayons X)
	Tl_2S	0,9 (R)	1,3	10 mA/lm		
	Cd S	0,52 (U.V.)	0,6	10 A/lm		
	Pb S	2,5 (I.R.)	3,5	3 mA/lm		
CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	Se	0,6 (B)	0,8	350 μA/lm	100 Hz Subminiatures jusqu'à 10 kHz	Luxmètres-Posemètres Commande de relais
PHOTODIODES	Si	0,75 (R)	1,2	500 μA/lm	< 10 kHz	Cinéma Piles solaires Contrôle industriel
	Ge	1,5 (I.R.)	2	500 μA/lm		

B sensible dans le bleu
V — — violet
R — — rouge

I.R. sensible dans l'infra-rouge
U.V. — — ultra-violet

VIII. TUBES DIVERS.

A - Tubes à rayons X (ou radiogènes).

1° Principe.

Un atome subissant un choc suffisamment énergétique de la part d'un électron perd un électron d'une couche profonde. L'atome excité revient rapidement à l'état stable par capture d'un électron venant d'une autre couche ou de l'extérieur avec libération d'un photon transportant une énergie :

$$h f = W_1 - W_0$$

W_1 : Energie potentielle du niveau de départ.
W_0 : Energie potentielle du niveau d'arrivée.
h : Constante de Planck.
f : Fréquence du rayonnement émis.

Lorsque l'énergie est suffisante il y a émission de rayons X.

— Les tubes radiogènes actuels (type Coolidge) possèdent une cathode chauffée. Les électrons émis sont concentrés et attirés par l'anode. Ils viennent frapper avec une très grande énergie une cible dite anticathode qui émet les rayons X.

2° Description (fig. 1-187).

a) Cathode :

Filament en tungstène chauffé par effet Joule.

b) Electrode de concentration.

Coupelle hémicylindrique qui crée un champ au voisinage du filament tel que les électrons émis soient concentrés sur l'anticathode dans une région appelée foyer électronique.

c) Anode.

Bloc de cuivre porté à une tension de quelques dizaines de kV pour les usages médicaux, à plusieurs milliers de kV pour les utilisations industrielles.

Lorsque la puissance dissipée est élevée, l'anode possède des ailettes avec refroidissement par air ou huile. Les tubes médicaux sont entièrement immergés dans l'huile.

d) Anti-cathode.

C'est une cible constituée par une pastille en tungstène enchâssée dans l'anode en cuivre. La forme est généralement rectangulaire.

e) Ampoule.

En verre dur du type Pyrex qui doit bien résister aux variations de température et être peu absorbant pour les rayons X. Sa forme allongée

lui donne une bonne tenue sous tension. Pour laisser passer les rayons X mous on utilise des fenêtres en verre de Lindemann ou en béryllium.

L'ampoule sous vide est scellée pour les petites puissances et montée sur pompe à vide pour grandes puissances.

f) Générateur de haute tension.

Pour les petites puissances, la haute tension est obtenue à partir du secteur au moyen d'un transformateur. Le prix de revient est réduit mais le tube doit supporter la tension inverse.

Pour les grandes puissances, on utilise des kénotrons donnant une alimentation redressée et constante après filtrage. Cette dernière solution permet un rendement plus élevé et un faisceau de rayons X plus homogène.

Dans certaines installations l'alimentation se fait par l'intermédiaire de la décharge d'un condensateur qui permet une très grande puissance instantanée.

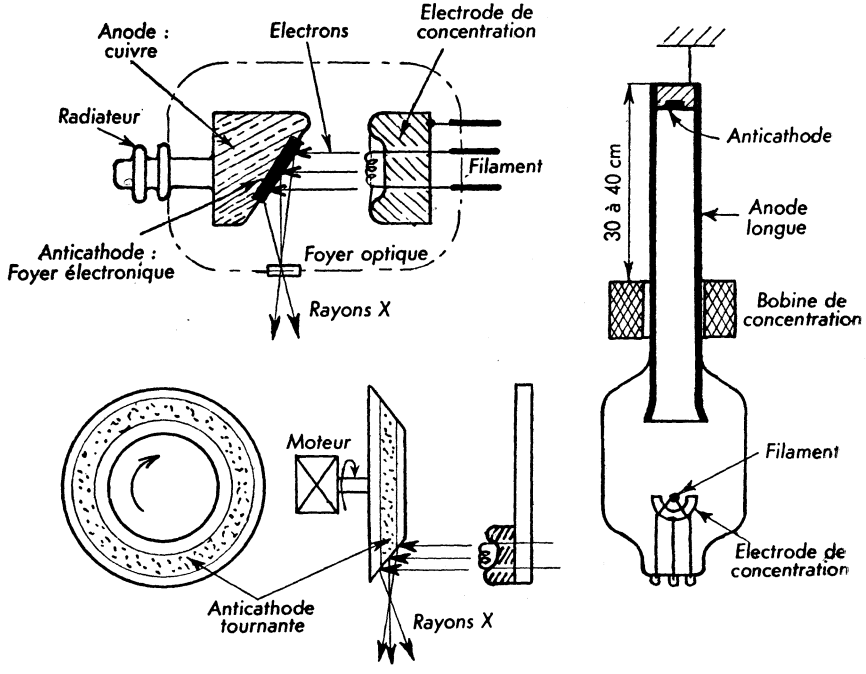


Fig. 1-187 à Fig. 1-189.
Tubes à rayons X.

3° Différents types.

a) Tubes à anticathode fixe.

— *Tubes bipolaires* (fig. 1-187).

Cathode et anode toutes deux isolées.

Encombrement total réduit.

— *Tubes unipolaires* (fig. 1-188).

L'anode de diamètre plus réduit est réunie à la terre. Le foyer électronique peut être formé loin de la cathode en utilisant une bobine de concentration magnétique.

b) Tubes à anticathode tournante (fig. 1-189).

Les possibilités des tubes à rayons X peuvent être augmentées par l'emploi d'une anticathode circulaire de grand diamètre qui présente devant le flux électronique une surface constamment renouvelée.

4° Applications.

a) Radiographie industrielle par transparence.

L'anticathode est toujours en tungstène. Le tube est scellé, à anode fixe, le plus souvent bipolaire. Tensions utilisées : 10 kV à 2 000 kV.

Ils sont employés pour l'examen des défauts internes des soudures ou des pièces moulées (1).

b) Radiocristallographie.

Ce sont des tubes unipolaires pompés qui permettent de changer la nature de l'anticathode en fonction du rayonnement recherché (rayonnement continu ou raies spectrales déterminées). Toutefois il existe des tubes scellés interchangeables suivant la nature du rayonnement à utiliser.

Les anticathodes les plus utilisées sont en tungstène (fond continu), en argent avec filtre en rhodium ($\lambda = 0{,}54$ Å), en molybdène avec filtre en zirconium ($\lambda = 0{,}71$ Å), en cuivre avec filtre en nickel ($\lambda = 1{,}54$ Å).

Ces tubes sont utilisés pour étudier la constitution cristalline des matériaux par diffraction des rayons X.

c) Radiographie médicale.

L'anticathode est en tungstène, le tube toujours scellé du type bipolaire. De plus en plus, on emploie les tubes à anticathode tournante. Tensions utilisées : 40 à 140 kV.

Ils sont utilisés pour examiner par transparence avec écran fluorescent (radioscopie) ou sur plaque photographique (radiographie) les anomalies du corps humain (fractures, tumeurs, objets étrangers...).

d) Radiothérapie.

Le tube est scellé à anode fixe. L'anticathode est en tungstène à foyer rond. Tensions utilisées 10 à 2 000 kV.

On fait appel ici à l'action destructrice des cellules vivantes par les rayons X. Cette action qui rend leur manipulation dangereuse est dans ce cas utilisée électivement pour détruire les cellules pathologiques.

(1) Dans le cas de très fortes épaisseurs ou de difficultés d'installation on utilise des sources de rayons γ à l'aide d'isotopes radioactifs (gammagraphie).

B - Tubes régulateurs d'intensité (fer-hydrogène).

1° Principe.

On utilise la propriété de solubilité de l'hydrogène dans le fer qui augmente beaucoup au voisinage de 900 °C du fait de sa transformation cristalline (fer α en fer γ).

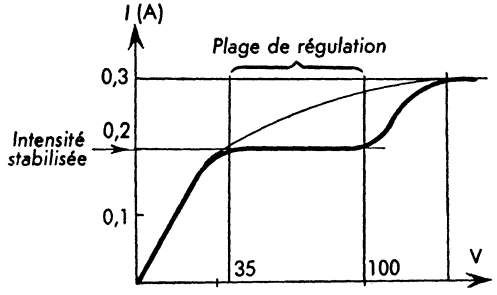


Fig. 1-190
Tube fer-hydrogène.

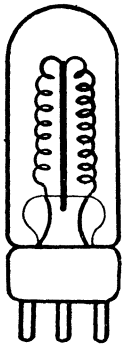


Fig. 1-191.

A cette température l'absorption de l'hydrogène par le fer provoque une baisse de pression avec diminution du refroidissement. La température augmentant, la résistance augmente sensiblement car le coefficient de température du fer est élevé (10 millièmes par °C).

La caractéristique courant tension (fig. 1-190) montre qu'il existe une région où le courant ne varie pratiquement pas en fonction de la tension.

Au-dessus d'une certaine valeur, le fer n'absorbe plus d'hydrogène et le courant recommence à croître.

2° Description (fig. 1-191).

Le tube de construction simple comporte un filament (110 V) ou deux (110-220 V) en fer pur dans une ampoule remplie d'hydrogène sous une pression de 100 mm Hg.

C - Thermocouples.

1° Principe.

Le couple thermo-électrique est constitué par une soudure fer-constantan qui produit une force électromotrice lorsqu'elle s'échauffe. On peut ainsi mesurer des intensités qui provoquent l'échauffement de la soudure.

2° Description.

Il existe des thermocouples à 2 fils croisés et soudés au point de croisement. Le courant H.F. traverse la soudure et l'échauffe (fig. 1-192). La différence de potentiel produite fait dévier l'aiguille d'un micro-ampèremètre.

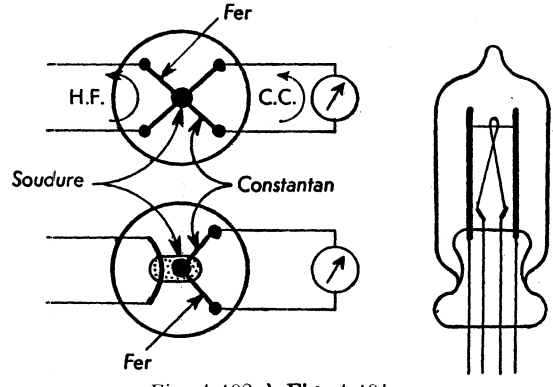


Fig. 1-192 à Fig. 1-194.
Thermocouples.

D'autres thermocouples sont à chauffage indirect (fig. 1-193 et 194). Le chauffage de la soudure se fait par induction H.F. produite par le courant à mesurer. La liaison thermique et mécanique des éléments est réalisée par une perle de verre. Le tout est enfermé dans un tube en verre vide d'air.

Pour la mesure de courants intenses, le fil chauffant est remplacé par une bande mince ou un tube (réduction de l'effet de peau).

D - Autres tubes.

Leur étude dépassant le cadre de cet ouvrage, nous ne ferons que citer pour mémoire :

— le spectrographe de masse qui permet la séparation magnétique des ions de masses différents,

— les accélérateurs de particules qui permettent de leur communiquer de très grandes vitesses (accélérateur linéaire, cyclotron, bétatron, synchrotron),

— les microscopes électroniques qui utilisent un faisceau électronique dirigé sur l'objet à examiner à l'aide de lentilles électroniques. Le grossissement peut atteindre 100 000,

— les « masers », amplificateurs de micro-ondes utilisant le rayonnement d'émission stimulée des atomes excités par un champ magnétique. Les « lasers » en sont une extension dans le domaine de l'infra-rouge et de la lumière visible. Leur bruit de fond est extrêmement faible,

— les « cryotrons », dispositifs qui utilisent la super-conductivité de certains métaux au voisinage du zéro absolu.

CHAPITRE 2

DISPOSITIFS A SEMI-CONDUCTEURS

I. GÉNÉRALITÉS.

A - Définitions.

1° Différents types.

— *Redresseur à contact par surface* : Redresseur électronique dont le fonctionnement est basé sur les propriétés d'un contact ayant une certaine étendue entre un métal et un semi-conducteur. C'est une cellule à couche d'arrêt.

— *Redresseur à contact par pointe* : Redresseur électronique dont le fonctionnement est basé sur les propriétés d'un contact entre une pointe métallique et un semi-conducteur extrinsèque.

— *Redresseur à cristal ou diode à cristal* : Dispositif de redressement constitué par un contact métal, semi-conducteur.

— *Transistor ou triode à cristal* : Dispositif amplificateur constitué par un ou plusieurs semi-conducteurs extrinsèques sur lesquels appuient un certain nombre d'électrodes, de telle façon que, lorsqu'un courant passe entre une des électrodes constituant l'électrode d'entrée (dite émetteur) et le bloc, on peut recueillir un courant amplifié entre une autre électrode constituant l'électrode de sortie (dite collecteur) et le bloc.

— *Thermistance* : voir Tome I.

— *Cellule photo-électrique* : voir chapitre 1er § VII.

2° Grandeurs caractéristiques.

— *Tension directe* : Tension appliquée entre les bornes d'un redresseur dans le sens qui correspond au passage du courant le plus élevé pour cette tension. Ce sens est dit « direct » (1).

(1) Les définitions tension, courant et résistance inverses s'obtiennent en remplaçant le sens « direct » par sens « inverse ».

— *Courant direct* : Courant résultant de la tension directe.

— *Résistance directe* : Résistance opposée par un contact au courant direct.

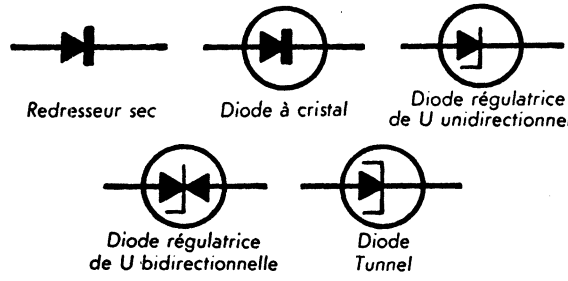


Fig. 2-1 à Fig. 2-5. — Fonction diode

— *Efficacité d'un redresseur* : Rapport de la composante continue de la tension redressée aux bornes d'entrée de l'appareil d'utilisation à l'amplitude maximale de la tension sinusoïdale de la source d'alimentation dans les conditions spécifiées.

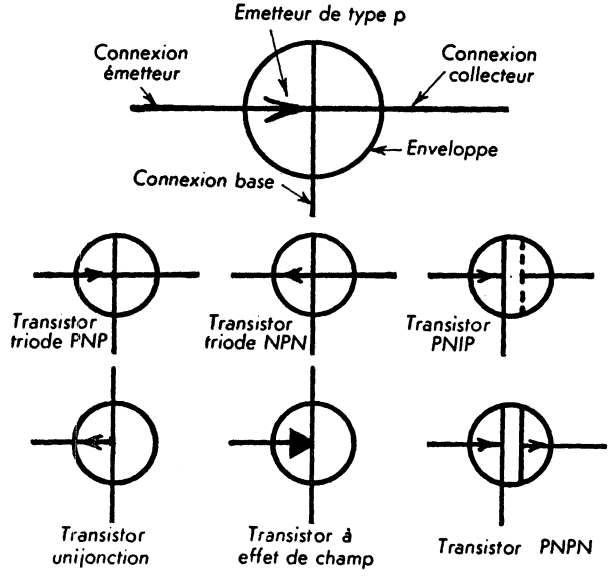


Fig. 2-6 à Fig. 2-12. — Fonction triode

— *Sensibilité (en courant) d'un redresseur à cristal* : Quotient du courant redressé de court-circuit par la puissance haute fréquence absorbée par le cristal.

— *Rendement d'un changeur de fréquence à cristal* : Rapport de la puissance de sortie à la puissance d'entrée du signal.

— *Pente de conversion d'un changeur de fréquence à cristal* : Inverse du rendement généralement exprimé en décibels.

B - Représentation schématique.

D'après spécification syndicale SITELESC N° 314 de janvier 1961, ce système de symboles qui a de grandes chances d'être adopté internationalement dans l'avenir a été proposé à la commission électrotechnique internationale conjointement par les comités français et suédois.

1° Fonction diode (fig. 2-1 à 2-5).

2° Fonction triode (fig. 2-6 à 2-12).

Les symboles utilisés actuellement pour les transistors sont donnés aux figures 2-13 et 2-14.

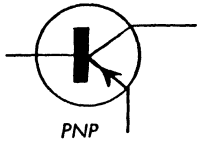


Fig. 2-13

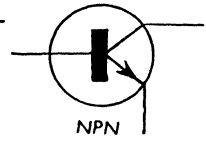


Fig. 2-14

II. REDRESSEURS SECS.

A - Principe.

Les redresseurs secs utilisent la conductibilité dissymétrique existant au contact métal-semi-conducteur. Au contact il se produit une diffusion des électrons du métal dans le semi-conducteur. Le départ de ces électrons fait apparaître dans le métal des charges positives équivalentes. Cette double couche électrique appelée *couche d'arrêt* provient du fait que les deux corps en contact possèdent des travaux d'extraction différents. La différence des potentiels de sortie s'appelle *barrière de potentiel.*

L'agitation thermique libère environ un million de fois plus d'électrons dans le métal que dans le semi-conducteur. La probabilité est donc très élevée de voir diffuser les électrons du métal vers le semi-conducteur mais par contre il sera très difficile aux électrons du semi-conducteur de franchir la barrière de potentiel.

D'après la convention, il sera facile d'établir un courant dans le sens semi-conducteur métal et au contraire très difficile d'établir un courant en sens inverse.

B - Matériaux.

	U efficace max V	I redressée mA/cm²	Température max °C	Seuil de redressement
Oxyde cuivreux Cu_2O	4 à 7	25 à 100	50	0,1
Sélénium Se ..	18	25 à 100	80	0,4
Sulfure cuivreux Cu_2S.	4 à 5	100 à 400	100	—

Les deux contacts les plus utilisés actuellement dont nous allons décrire la fabrication sont ceux à cuivre-oxyde cuivreux avec contre-électrode en plomb et surtout ceux au sélénium avec contre-électrode en fer nickelé ou alliage léger (fig. 2-15 et 2-16) (1).

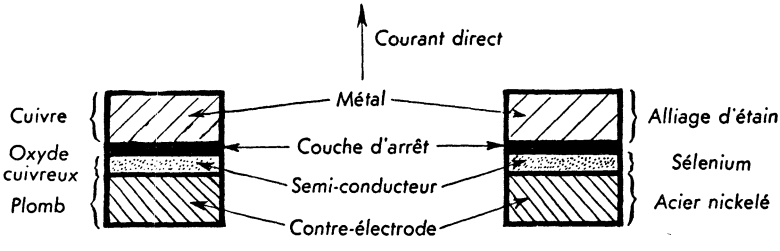


Fig. 2-15 Fig. 2-16.
Redresseurs secs

Le sulfure cuivreux permet des densités de courant plus élevées mais donne un courant inverse important.

Depuis peu on a réalisé des redresseurs titane-bioxyde de titane (TiO_2) qui résistent à haute température.

C - Fabrication.

1° Redresseurs à l'oxyde cuivreux (dits oxymétal ou cuproxyde). Les principales étapes de la fabrication sont :

— Découpage de plaquettes circulaires ou rectangulaires en cuivre électrolytique.

(1) La contre-électrode a pour but de répartir le courant sur toute la surface du semi-conducteur afin que la résistance dans le sens direct soit petite. Elle sert aussi pour la protection et le refroidissement.

— Formation d'oxyde cuivreux par chauffage aux environs de 1 000 °C dans un four pendant 10 minutes.

— Obtention de la couche d'arrêt en laissant les plaquettes 10 minutes dans une enceinte à 600 °C.

— Refroidissement brusque à la température ambiante.

L'une des faces doit être protégée de l'oxydation pendant la cuisson sinon il faut enlever par abrasion l'oxyde sur une face.

Pendant le refroidissement il se produit à la surface de l'oxyde cuivreux (Cu_2O) de l'oxyde cuivrique isolant (CuO) qu'il faut supprimer par trempage dans un bain d'acide.

La couche finale d'oxyde cuivreux obtenue a 0,1 mm d'épaisseur environ.

Le contact sur l'oxyde de cuivre est obtenu par une rondelle de plomb graphité ou par projection d'alliages à bas point de fusion.

2° Redresseurs au sélénium.

— Découpage des plaquettes servant de contre-électrode en acier nickelé ou en aluminium bismuthé pour neutraliser la couche d'alumine.

— Dépôt de la couche de sélénium soit par saupoudrage et compression à chaud, soit par vaporisation sous vide à 240 °C.

— Formation du sélénium cristallin par traitement thermique à 80 °C.

— Projection de l'électrode conductrice sur le sélénium. On utilise des alliages d'étain-plomb-bismuth ou de zinc-cadmium-bismuth.

La composition et la pureté de ces alliages ont une grande importance.

Les redresseurs subissent avant leur livraison plusieurs traitements de vieillissement artificiel qui leur confèrent une très grande stabilité.

D - Protection.

Les modèles ordinaires ou à ailettes sont simplement protégés par un vernis ou une peinture.

Les redresseurs à faible dissipation thermique peuvent être sous tube cylindrique ou boîtier prismatique en bakélite.

Les modèles étanches sont obtenus par sertissage du boîtier et vernis spécial ou sous moulage polyester. Les éléments tropicalisés sont enfermés dans des boîtiers étanches en acier cadmié bichromaté recouverts d'un vernis fongicide avec sorties par perles de verre.

E - Limites d'emploi.

1° Caractéristique tension-intensité (fig. 2-17).

Pour les tensions directes la courbe est sensiblement droite après le coude. Pour les tensions inverses la caractéristique a une forme exponentielle.

2° Seuil de redressement.

Pour les petites tensions la résistance directe est du même ordre que la résistance inverse. Il n'y a redressement que si la tension dépasse une certaine valeur dite seuil de redressement qui est de 0,4 volt pour les redresseurs au sélénium et 0,1 volt pour les redresseurs à l'oxyde cuivreux.

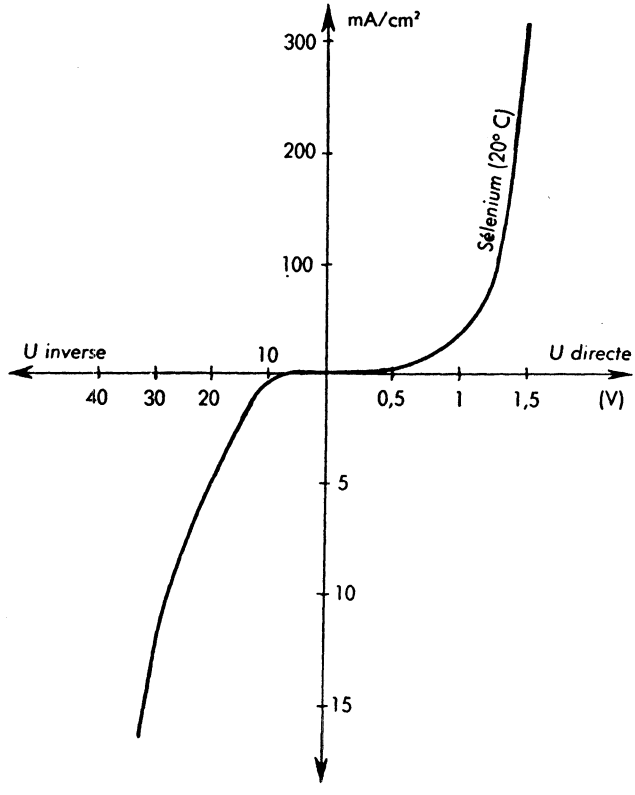


Fig. 2-17. — Caractéristique tension-intensité

3° Tension efficace inverse maximale.

5 à 6 volts par élément pour les redresseurs à l'oxyde cuivreux.
20 à 30 volts par élément pour les redresseurs au sélénium.

4° Densité de courant redressée.

0,1 A/cm² max. pour les redresseurs à l'oxyde cuivreux.
0,2 A/cm² max. pour les redresseurs au sélénium.

5° Refroidissement.

Les chiffres donnés par les constructeurs en ce qui concerne l'intensité redressée doivent être multipliés par un coefficient compris entre 2 et 3 en ventilation forcée (5 m/s).

La température maximale en charge est de 50 °C pour les redresseurs à l'oxyde cuivreux et de 80 °C pour ceux au sélénium.

6° Chute de tension interne.

Elle est sensiblement proportionnelle à l'intensité redressée alors qu'elle est constante pour les redresseurs à vapeur de Hg.

7° Fréquence maximale d'emploi.

Pour les applications usuelles elle est limitée à 15 000 Hz. Les redresseurs à oxyde cuivreux ont une capacité plus faible et des types spéciaux sont utilisés jusqu'à 3 MHz.

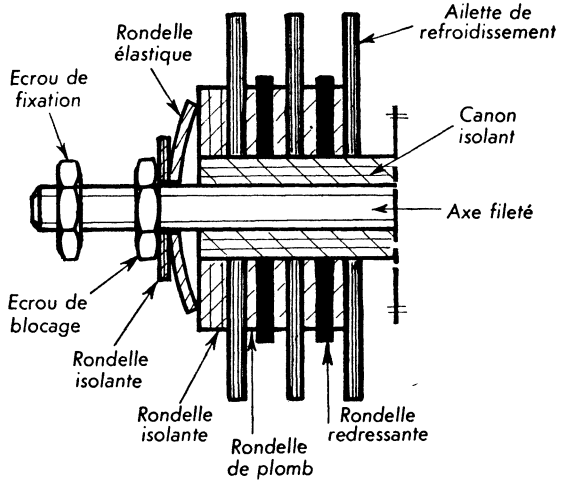


Fig. 2-18. — Redresseur à l'oxyde cuivreux

F - Différents modèles.

1° D'après le mode de serrage.

La pression de serrage influe sur les propriétés du redresseur. Elle est soigneusement réglée à la fabrication et les éléments ne sont généralement pas démontables (10 à 15 N/cm² pour les redresseurs au sélénium).

— Serrage par écrous et rondelles élastiques (fig. 2-20).
— Serrage par sertissage (fig. 2-19).
— Serrage par pinces : redresseurs miniatures (fig. 2-24).
— Autoserrage (fig. 2-21 à 2-23).

2° D'après le mode de refroidissement.

Dans l'ordre croissant des densités de courant redressées nous trouvons :

— Refroidissement à air naturel (fig. 2-20).

— Refroidissement par contact (fig. 2-27).

La chaleur étant évacuée par conduction dans le châssis sur lequel il est fixé, l'élément exige un contact intime de toute la surface de base.

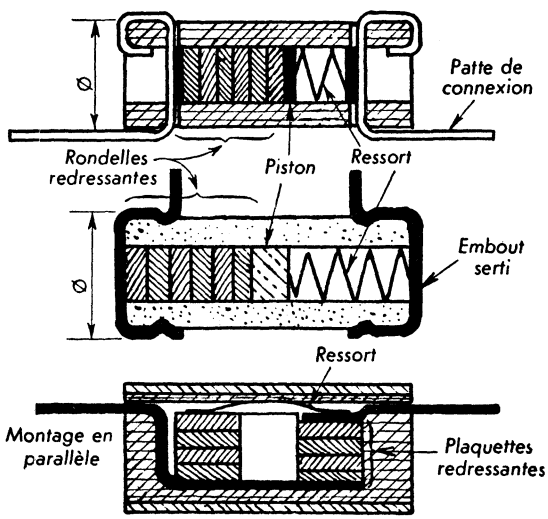


Fig. 2-21 à Fig. 2-23. — Redresseurs au sélénium

— Refroidissement par ailettes (fig. 2-18 et 2-19).

Le diamètre des ailettes de refroidissement en laiton est environ le double du diamètre des rondelles redressantes.

Pour faciliter la circulation de l'air il est recommandé de les monter axe horizontal.

— Refroidissement par ventilation forcée.

— Refroidissement par eau.

3° D'après le mode de fixation.

— par pattes (fig. 2-21).

— par cosses (fig. 2-20).

— par fils (fig. 2-25 et 2-24).

4° D'après le mode de montage.

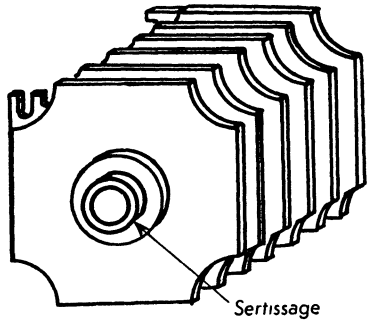


Fig. 2-19

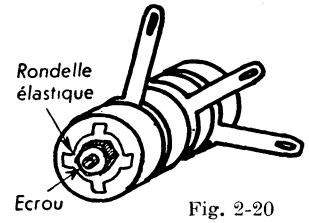


Fig. 2-20

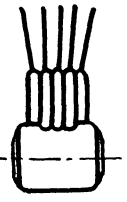


Fig. 2-25

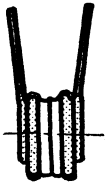


Fig. 2-26

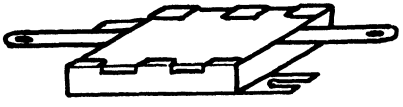


Fig. 2-27

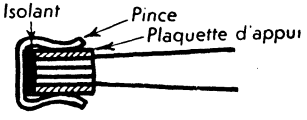


Fig. 2-24

Redresseurs secs : différents modèles

G - Caractéristiques des cellules au sélénium.

La norme C 53-210 précise quelles sont les caractéristiques qui, lors d'une commande, doivent faire l'objet d'un accord entre le fabricant et le client. Ce sont :

1° Le mode de montage électrique.

— Montage en série (monophasé) (fig. 2-28).
— Montage en pont (monophasé) (fig. 2-29).
— Montage en va-et-vient ou push-pull (monophasé) (fig. 2-30).
— Montage en doubleur de tension (monophasé) (fig. 2-31).
— Montage en alternance (triphasé) (fig. 2-32).
— Montage en pont (trihexaphasé) (fig. 2-33).

2° La tension nominale d'alimentation.

Valeur efficace de la tension d'alimentation pour laquelle la cellule a été établie.

3° La fréquence nominale d'alimentation.

Fréquence du courant d'ailimentation pour laquelle la cellule a été établie.

4° La tension redressée nominale.

Valeur de la tension redressée en vue de laquelle la cellule a été établie, pour le courant redressé nominal.

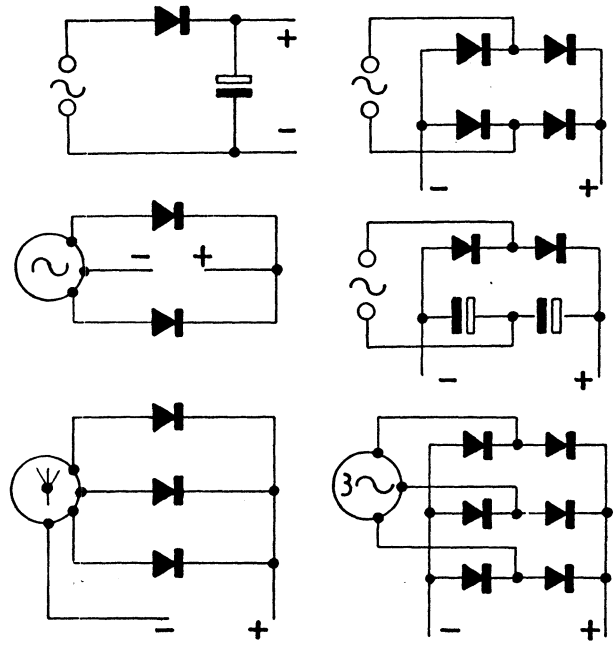


Fig. 2-28 à Fig. 2-33. — Montage des redresseurs

5° Le courant redressé nominal.

Valeur du courant redressé en vue de laquelle la cellule a été établie.

6° La nature du circuit d'utilisation.

— Circuit pratiquement purement résistant.
— Circuit capacitif.
— Circuit inductif.
— Circuit de charge de batterie.

En l'absence d'indications contraires, il s'agit d'un circuit purement résistant.

7° Service nominal.

Les différents types de service sont définis par les règles d'échauffement du matériel électrique (publication C 20-050). En l'absence d'indications contraires, le service nominal est un service continu.

8° Le mode de refroidissement ainsi que :

— Dans le cas d'une cellule à refroidissement par air, la température ambiante nominale.

— Dans le cas d'une cellule non destinée à être immergée dans l'huile, le degré de protection contre la corrosion.

Les températures ambiantes nominales sont de 35 °C dans le cas du refroidissement par air et 25 °C dans le cas du refroidissement par eau.

Eventuellement :

9° L'aptitude aux basses pressions.

10° Les dimensions de la cellule.

11° Le rendement.

12° Les caractéristiques directe et inverse.

H - Marquage.

Les cellules doivent porter en caractères lisibles et indélébiles les indications suivantes :

1° Le nom ou la marque de fabricant.

2° La désignation des dimensions de plaques et de leur groupement.

3° Le mois et l'année de fabrication.

4° Des repères sur les bornes du courant redressé (signe + ou marque rouge, signe — ou marque bleue).

5° Des repères sur les bornes du courant alternatif (signe ~ ou marques jaunes).

I - Essais des cellules au sélénium.

1° Essais de qualification.

Ce sont des essais destinés à mesurer ou vérifier l'ensemble des qualités d'un type de cellule. Ils sont effectués sur des cellules d'un type nouveau ou sur des cellules de fabrication courante en vue de vérifier la constance de leurs qualités.

— Vérification des dimensions des plaques.
— Vérification relative aux caractéristiques directe et inverse.
— Rendement conventionnel.

— Vérification relative au courant redressé nominal.
— Vérification relative à l'échauffement.
— Courant inverse.
— Essais diélectriques à la pression atmosphérique normale.
— Epreuve de tension à basse pression s'il y a lieu.
— Mesure de la résistance d'isolement.
— Résistance mécanique des sorties.
— Résistance aux vibrations.
— Possibilité d'exécution des soudures.
— Epreuve hygroscopique.
— Vérification relative à la stabilisation accélérée.

2° Essais de réception.

Ils sont destinés au contrôle des appareils faisant partie d'une commande et comprennent :

a) Essais individuels.

— Vérification relative au courant redressé nominal.
— Essais diélectriques à la pression atmosphérique normale.

b) Essais sur prélèvement.

— Vérification des dimensions de la cellule.
— Vérification relative aux caractéristiques directe et inverse, facultativement.
— Vérification du rendement de la cellule, le cas échéant.
— Mesure de la résistance d'isolement.

J - Applications.

1° Redresseurs au sélénium.

Les redresseurs secs au sélénium concurrencent de plus en plus les valves à vide dans les applications radio-électriques et mis à part les installations de grande puissance avec convertisseurs à vapeur de mercure ils ont un champ d'applications très étendu dans le domaine du redressement industriel du fait des qualités suivantes :

— Robustesse — Durée illimitée.
— Fonctionnement silencieux — Rendement élevé.

Leurs utilisations principales sont :

— Radioélectricité : alimentation des téléviseurs, des récepteurs tous courants ou pile-secteur, des cadres antiparasites.
— Alimentation des centraux téléphoniques à cause de leur rendement satisfaisant lorsque les variations d'intensités sont très rapides.
— Convertisseurs pour soudure électrique à l'arc en courant continu (U = 70 à 80 V ; I = 300 à 500 A).
— Installations d'électrolyse et d'électrochimie (U = 5 à 20 V ; $I >$ 1 000 A).

— Recharge de batteries d'accumulateurs pour centraux téléphoniques, véhicules électriques ou automobiles.

— Installations de précipitation électrostatique (dépoussiérage, peinture électrostatique).

— Alimentation de moteurs à courant continu avec possibilité de fractionner la puissance redressée en fractions indépendantes sans augmentation de prix de revient.

2° Redresseurs à l'oxyde cuivreux.

Ils ne sont plus guère utilisés actuellement. Ils ont cédé la place aux redresseurs au sélénium et aux diodes à cristal.

A puissance égale, ils ont un encombrement double des redresseurs au sélénium et leur vieillissement est assez prononcé.

Les deux applications subsistantes sont les appareils de mesure de tensions alternatives à cadre mobile et aimant permanent, et les modulateurs en télécommunications BF car ils ont un seuil de redressement plus faible et une capacité plus réduite que les redresseurs au sélénium.

3° Régulateurs de tensions continues.

Ce sont des plaquettes métalliques recouvertes de sélénium, traitées de sorte que la chute de tension aux bornes varie peu pour des variations importantes de courant.

III. DIODES A CRISTAL.

A - Principe.

Considérons une jonction *n-p* [1] schématisée à la figure 2-34. Les électrons libres du cristal *n* représentés par les signes (—) et les lacunes du cristal *p* par les signes (+) sont animés d'un mouvement désordonné en l'absence de champ extérieur.

Si on applique une tension inverse (fig. 2-35) les électrons libres et les trous attirés par les polarités de sens contraire s'écartent de la jonction. Il n'y a que quelques électrons qui arrivent à traverser la barrière de potentiel existante à la jonction. La résistance très grande dans le sens inverse (de 1 M Ω environ) ne permet le passage que d'un très faible courant.

Si au contraire on applique une tension directe (fig. 2-36) les électrons et les trous sont repoussés en grand nombre vers la jonction. Les polarités étant de signes contraires de chaque côté de la jonction, les électrons traversent en grand nombre la barrière de potentiel et viennent combler les trous qui se reforment constamment du fait du déplacement des électrons

[1] L'étude des semi-conducteurs de type *p* et de type *n* a été faite au chapitre 5 du tome I.

en sens contraire. La résistance dans le sens direct très faible (de quelques Ω) permet le passage d'un courant important qui augmente rapidement avec la tension appliquée.

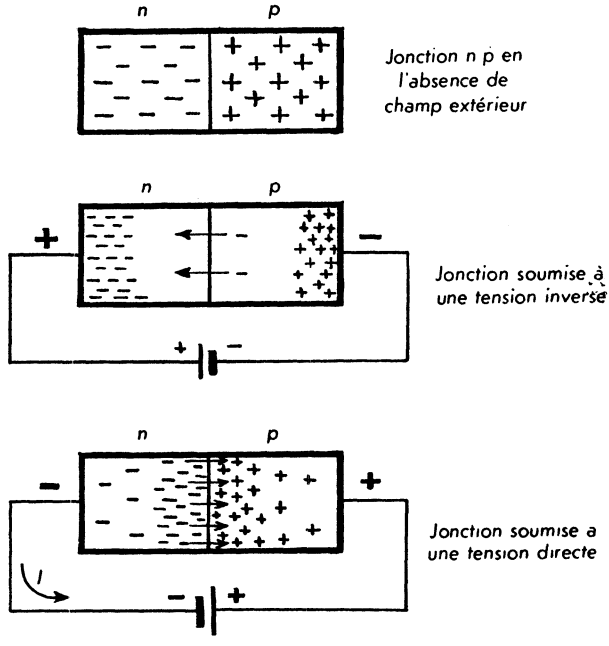


Fig. 2-34 à Fig. 2-36. — Diode à jonction

La conductibilité unilatérale de la jonction *n-p* permet donc, comme le contact métal-semi-conducteur, de redresser les tensions alternatives.

B - Fabrication.

On utilise pour réaliser les jonctions *n-p* le germanium et le silicium dont les propriétés et la fabrication ont été étudiées dans le tome I.

1° Diodes à jonction au germanium (fig. 2-37 à 2-39).

Les principales opérations sont les suivantes :

— Découpage de plaquettes de germanium dans le monocristal au moyen de scies circulaires diamantées.

— Décapage et collage sur des plaques de verre pour subir un rodage les amenant à la cote désirée.

— Obtention de la forme définitive par découpage aux ultrasons (pastilles rondes) ou sciage de grande précision (pastilles carrées).

— Décapage, tri en épaisseur, contrôle et lavage.

— Montage dans un calibre d'une pastille de soudure en étain, d'une pastille de germanium de type *n* et d'une sphérule d'indium (1 mm³).

— Chauffage à 550 °C (¹) dans un four en atmosphère d'hydrogène purifié, où la jonction est réalisée par diffusion de l'indium à l'intérieur du cristal de germanium qui, localement, passe au type *p*. La diffusion pour une pénétration de quelques dizaines de microns exige plusieurs dizaines d'heures.

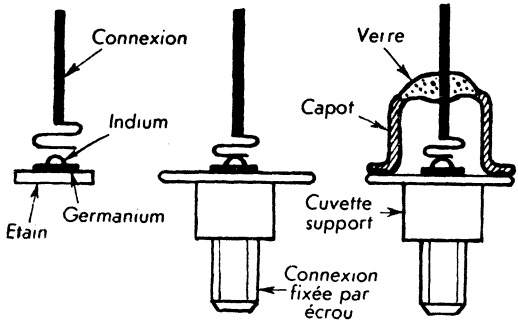


Fig. 2-37 à Fig. 2-39.
Fabrication d'une diode à jonction au G_e

— Soudage de la tige de connexion en tungstène sur la pastille d'indium. Cette connexion recourbée en forme de ressort est soudée dans un jet d'azote chauffé.

— Les éléments sont enfermés dans l'enveloppe comportant un capot soudé électriquement à la cuvette support. Le capot est surmonté d'un queusot permettant l'élimination de toute trace d'humidité par un séjour prolongé dans une cloche à vide.

— Fermeture du queusot.

— Contrôle et essais de durée.

2° **Diodes à pointe au germanium** (fig. 2-40 à 2-42).

La préparation des plaquettes est identique à celle décrite pour les diodes à jonction.

— La connexion de cathode en copperclad est soudée au fond de l'enveloppe en verre. (∅ intérieur 1,5 mm, longueur 7 mm).

— L'enveloppe maintenue verticalement dans une forme en graphite, est remplie d'une pastille de soudure et d'une « puce » de germanium type *n*.

— Soudage de la pastille dans un four en atmosphère neutre.

— Décapage, rinçage et étuvage pour enlever toute trace d'humidité.

— Soudage de l'anode en copperclad dans une perle de verre.

(¹) 1 200 °C pour le silicium.

— Le fil de connexion d'anode est ensuite prolongé par une fine pointe en fil d'or, de platine ou de tungstène de diamètre 10 μ environ obtenue par polissage électrolytique.

— La pointe est soudée au germanium et le tube fermé par soudure dans un solénoïde porté au rouge.

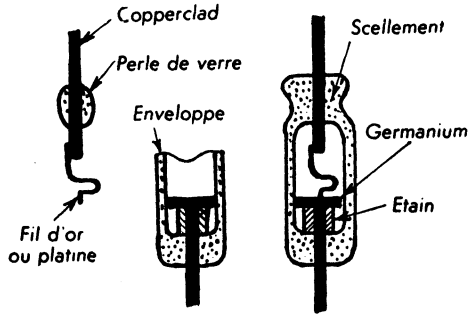


Fig. 2-40 à Fig. 2-42.
Fabrication d'une diode à pointe au G_e

— La diode subit alors un traitement de formation (surintensité) qui crée une jonction *p-n* par diffusion d'impuretés de la pointe métallique dans le cristal de type *n*.

— Etamage des sorties, contrôle et essais.

3° Diodes au silicium.

Les diodes au silicium sont fabriquées de façon analogue à celles au germanium avec les particularités suivantes :

— Plus grande difficulté d'obtention du silicium pur, car il a un point de fusion plus élevé que le germanium.

— La pointe ne peut pas être soudée. Elle est simplement appuyée d'où moins grande résistance aux chocs et aux accélérations.

— Le silicium utilisé pour les diodes à pointes est du type *p* et le courant direct circule dans le sens pastille pointe.

— Dans le cas de diodes à jonction, la diffusion de l'impureté (aluminium) s'effectue par l'un des trois procédés suivants : diffusion gazeuse, dépôt solide à partir d'une solution dans un liquide très volatil, diffusion en tube scellé.

C - Caractéristiques.

1° Diodes à pointe.

a) Caractéristique courant-tension (fig. 2-43.).

La courbe est analogue à celle étudiée pour les redresseurs secs. Le seuil de redressement est faible (0,1 V).

b) Tension inverse maximale de crête.

V_{Rmax} = 20 à 150 V.

c) Courant direct max. (courant continu).

I_{Fmax} = 60 à 200 mA.

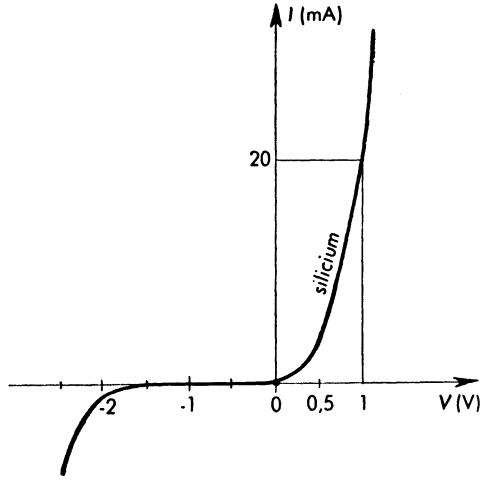


Fig. 2-43. — Caractéristique d'une diode à pointe

d) Courant direct max. de crête (pendant 1 s max.).

i_{Fmax} = 100 à 1 000 mA.

e) Courant moyen redressé.

I_0 = 20 à 50 mA.

f) Plages de températures.

— 40 °C à + 70 °C pour les diodes Ge.
— 40 °C à + 150 °C pour les diodes Si.

g) Fréquence maximale d'utilisation.

Jusqu'à une centaine de MHz pour les modèles ordinaires (C = 0,25 à 1 pF).

h) Coefficient de température.

Il est négatif et la résistance directe décroît lorsque la température augmente (libération d'électrons par l'agitation thermique).

2° Diodes à jonction.

a) Tension inverse maximale de crête.

20 à 300 V pour les redresseurs au Ge.
100 à 1 000 V pour les redresseurs au Si.

b) Intensité moyenne redressée.

100 mA à 20 A en refroidissement naturel Jusqu'à 75 A en refroidissement forcé (5 m/s)	Redresseurs au Ge.
750 mA à 70 A en refroidissement naturel Jusqu'à 150 A en refroidissement forcé (5 m/s)	Redresseurs au Si.

c) Plages de températures.

— 40 à + 60 °C pour les redresseurs Ge.
— 65 à + 115 °C pour les redresseurs au Si.

Les valeurs des intensités moyennes redressées sont données pour une température d'utilisation de 25 °C. Ces intensités diminuent lorsque la température augmente.

d) Fréquences max. d'utilisation.

— 50 kHz pour les redresseurs au Ge.
— 15 kHz pour les redresseurs au Si.

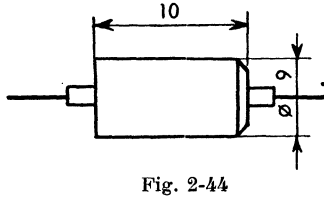


Fig. 2-44

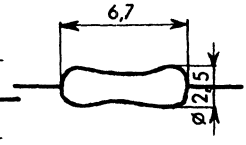


Fig. 2-45

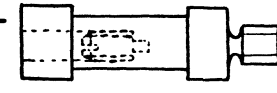


Fig. 2-46

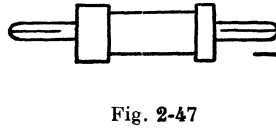


Fig. 2-47

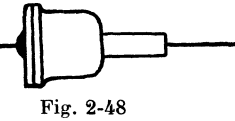


Fig. 2-48

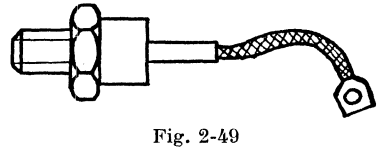


Fig. 2-49

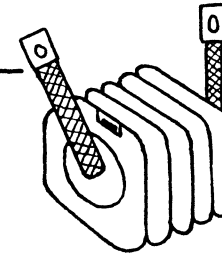


Fig. 2-50

Fig. 2-44 à Fig. 2-50. — Diodes à cristal

D - Différents modèles.

Diodes à pointes :

— enveloppe verre, sorties par fils (fig. 2-44).
— enveloppe céramique, sorties par fils (fig. 2-45),
— fixation par embout vissé (fig. 2-46),
— fixation par enfichage (fig. 2-47).

Diodes à jonction dans l'ordre de puissances croissantes :

— sorties par fils (fig. 2-48),
— fixation par embout vissé et tresse souple (fig. 2-49),
— à refroidissement par ailettes (fig. 2-50).

E - Applications.

Les nombreuses qualités des diodes à cristaux, que nous allons résumer ici, leur permettent de concurrencer victorieusement les diodes à vide en H.F. (diodes à pointe) et les redresseurs secs (diodes à jonction).

1° Avantages.

— Pas de chauffage d'où fonctionnement instantané;
— Rendement excellent pouvant atteindre 98 %;
— Excellents détecteurs de bas niveau;
— Fréquences limites d'emploi élevées;
— Durée de vie pratiquement illimitée.
— Encombrement très réduit;
— Facilité de montage (sans support);
— Etanchéité d'où grande résistance à l'humidité et aux agents tropicaux;
— Les diodes à pointe sous verre ont une masse inférieure à 1 gramme.
— Grande résistance aux chocs pour les diodes à contact soudé.
— Diodes au silicium utilisables jusqu'à + 150 °C.

2° Inconvénients.

— Existence du courant inverse aux tensions inverses élevées;
— Tension inverse admissible plus faible que pour les diodes à vide;
— Les caractéristiques dépendent de la température mais elles retrouvent leurs caractéristiques normales après des variations de température importantes;
— Elles sont sensibles aux flux lumineux alternatifs qui peuvent occasionner des ronflements dans certains montages (protection des diodes sous verre par peinture opaque).

3° Utilisations.

a) Diodes à pointe au germanium.

— Détecteurs de tensions faibles et moyennes en radio et télévision;
— Discriminateurs en F.M.
— Générateurs d'harmoniques, mélangeurs, limiteurs;
— Modulateurs pour système de télécommunications à courants porteurs.

b) Diodes à pointe au silicium.

D'emploi plus restreint, elles remplacent les diodes au germanium pour fonctionnement à des températures et des fréquences plus élevées.

TABLEAU COMPARATIF DES REDRESSEURS

	Valve à vide	Kénotron	Phanotron	Soupape verre	Excitron	Mutateur	Ignitron	(1) Redresseur sélénium	(1) Redresseur germanium	(1) Redresseur silicium
Courant moyen redressé	100 mA à 300 mA	10 mA à 200 mA	0,5 A à 50 A	5 A à 600 A	50 A à 2 000 A	10 000 A	700 A crête	1 mA à 10 A	100 mA à 75 A	750 mA à 150 A
Tension inverse maximale de crête	300 V à 400 V	50 kV à 200 kV	3 kV à 20 kV	100 V à 6 000 V	1 kV à 100 kV	600 V	300 V à 750 V	30 V à 50 V	50 V à 500 V	100 V à 1 000 V
Puissance redressée	100 W	20 kW	500 kW	30 kW	3 000 kW	6 000 kW	3 000 kW	300 W	5 kW	10 kW

(1) Les valeurs sont données par élément.

c) Redresseurs à jonction.

Ils concurrencent les redresseurs secs dans toutes les applications de redressement étudiées au § II J du présent chapitre (redresseurs industriels de fortes et moyennes puissances, alimentation de téléviseurs, etc.). Des installations pour l'électrochimie utilisent des redresseurs au germanium ou au silicium fournissant 100 000 ampères sous plus de 500 volts.

IV. DISPOSITIFS SPÉCIAUX A JONCTION.

A - Photodiodes.

Elles ont été étudiées au chapitre premier § VII E.

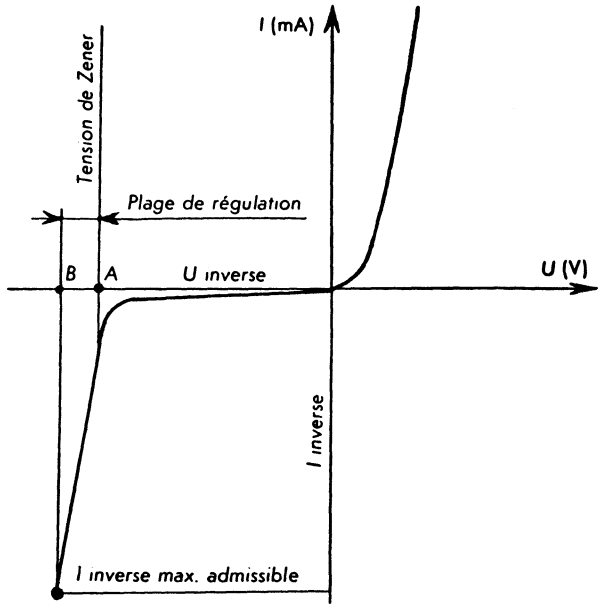


Fig. 2-51. — Caractéristique d'une diode régulatrice de tension

B - Diodes régulatrices de tension (diodes Zener).

1° Principe.

Ce sont des diodes à jonction au silicium dont on utilise la partie inverse de la caractéristique courant-tension.

Lorsque la tension inverse est suffisante, le champ électrique devient très important et permet le passage d'un courant inverse qui augmente très rapidement (fig. 2-51).

La valeur de la tension inverse pour laquelle le courant se met à augmenter rapidement s'appelle tension de Zener.

L'intensité ne doit pas dépasser une certaine valeur dite intensité inverse maximale admissible, auquel cas l'échauffement produirait la destruction de la jonction.

Dans la région AB de la caractéristique, la tension aux bornes de la diode est pratiquement indépendante du courant qui la traverse.

Les diodes au silicium peuvent être réalisées de manière à obtenir la tension de **régulation** désirable en dosant la concentration des impuretés dans la jonction.

2° Applications.

La principale utilisation est la régulation de tension à ± 1 %. Les tensions de **régulation** obtenues vont de 2 à 600 V permettant des régulations pour des tensions plus élevées ou plus basses qu'avec les diodes à gaz.

L'intensité continue inverse maximale admissible va de 40 à 150 mA mais la surcharge instantanée pendant 0,01 s peut dépasser 1 A.

Les diodes **régulatrices** peuvent servir à fournir une tension de référence dans les appareils de mesure ou encore être utilisées comme organes de protection contre les surcharges dans les circuits à courant continu.

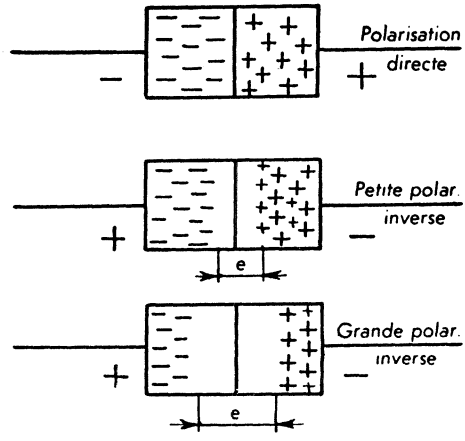


Fig. 2-52 à Fig. 2-54. — Diode à capacité variable

C - Diodes à capacité variable « Varicaps ».

La capacité des diodes à jonction augmente avec la polarisation inverse (fig. 2-52 à 2-54). C'est la zone de transition (*e*) qui constitue un diélectrique d'épaisseur variable avec la tension. La capacité est inversement proportionnelle à la racine carrée de la tension de polarisation.

On fabrique ainsi des condensateurs ajustables avec la tension (20 à 56 pF) utilisables jusqu'à 500 MHz dans les circuits de modulation de fréquence ou de télévision. Ce sont des diodes au silicium obtenues par alliage.

D - Diodes tunnel.

L'effet tunnel est un phénomène seulement explicable par la nature ondulatoire de l'électron.

Alors que l'électron considéré comme corpuscule est réfléchi par une barrière de potentiel, en mécanique ondulatoire, l'électron peut être assimilé à une onde incidente. Une partie de cette onde se trouve réfléchie et une autre partie transmise à travers la barrière de potentiel (effet tunnel).

Une diode tunnel est une diode *p - n* fortement dopée de manière à réaliser une barrière de potentiel de faible épaisseur car la probabilité de passage par effet tunnel est plus grande (1).

Le phénomène crée un courant en sens inverse du courant normal, d'où une caractéristique courant-tension ayant une zone à résistance négative utilisée sur des montages oscillateurs, amplificateurs et dispositifs de bascule (temps de basculement : 10^{-9} s).

E - Semi-conducteurs à effet Peltier.

Noux avons vu (thermocouples § VIII C chapitre premier) la production d'une force électromotrice à partir du chauffage de la soudure au contact de deux métaux de nature différente. On peut réaliser l'effet inverse (effet Peltier) c'est-à-dire transporter de la chaleur d'un point à un autre en faisant parcourir une jonction *n-p* par un courant électrique.

Des réfrigérateurs à effet Peltier sont déjà construits aux U.S.A. et en U.R.S.S. en utilisant des complexes de semi-conducteurs à base de tellurure de Bismuth ($Bi_2 Te_3$). La chaleur est absorbée par la jonction à l'intérieur du réfrigérateur et rejetée à l'extérieur.

V. TRANSISTORS.

A - Principe.

1° Transistor à alliage.

Considérons un transistor du type *n p n* (fig. 2-55). Si nous appliquons une tension positive au collecteur et une tension négative à l'émetteur tout en laissant la connexion de base libre on constate un déplacement des charges comme l'indique la figure. Seuls quelques électrons arrivent à franchir la

(1) La concentration en impuretés est 10^5 à 10^6 fois plus élevée que pour une diode ordinaire et la barrière de potentiel a une épaisseur de 0,01 μ environ.

barrière de potentiel constituée par la première jonction. Il existe un faible courant de repos qui augmente d'ailleurs avec la température du fait de l'agitation thermique.

Lorsqu'on applique une tension positive sur la base (fig. 2-56) émetteur et base constituent une diode à jonction avec traversée d'électrons en grand nombre de la barrière de potentiel. Aussitôt arrivés dans la base ils sont soumis au champ du collecteur beaucoup plus élevé que celui de la base (10 à 50 fois) et se dirigent vers le collecteur.

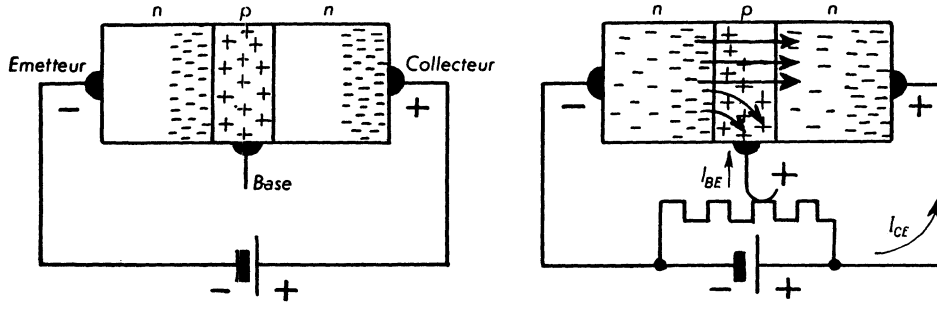


Fig. 2-55 et Fig. 2-56. — Transistor : principe

Le courant circule donc dans le sens collecteur-émetteur avec possibilité de faire varier sa valeur en modifiant la tension positive de la base.

Emetteur, base, collecteur jouent les mêmes rôles que cathode, grille, anode des triodes à vide avec les différences principales suivantes :

— courant de repos pratiquement nul;

— fonctionnement obligatoire avec courant de base;

— tension d'alimentation 10 à 100 fois plus faible qu'avec les tubes à vide.

L'explication reste valable pour un transistor p - n - p en remplaçant le terme électron par trou positif.

2° Transistor à base diffusée « Mésa ».

La technique de fabrication particulière (figure 2-57) permet d'obtenir un émetteur étroit, une base mince diffusée à haute concentration d'impuretés.

L'épaisseur de base très faible, de l'ordre de 1 μ, permet d'obtenir une fréquence de coupure de 500 MHz.

Les surfaces de base et d'émetteur sont réglées par la technique des masques d'oxyde qui limitent la diffusion des impuretés.

Par rapport aux transistors ordinaires, ils présentent les avantages suivants :

— Plus grande simplicité de fabrication;

— Facteur de mérite (produit de la puissance maximale par la fréquence d'emploi maximale) plus élevé;

— Plus grande robustesse.

3° Transistor à effet de champ (Technétron) (1).

De nombreux modèles de transistors à effet de champ sont actuellement en cours d'études au laboratoire. Dans bien des applications ils supplanteront les tubes à vide et transistors à jonction. Le « technétron », C.F.T.H. est le premier à être fabriqué industriellement. Son principe est le suivant :

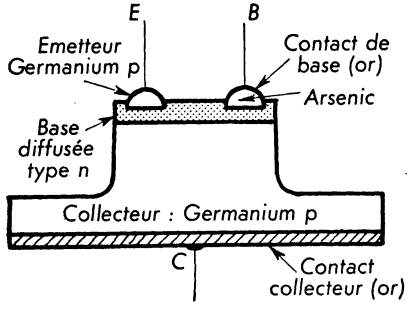


Fig. 2-57. — Transistor « Misa »

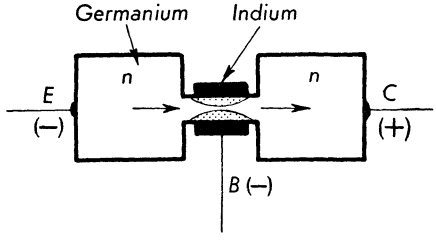


Fig. 2-58. — Technétron

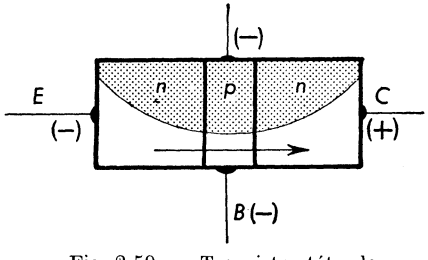


Fig. 2-59. — Transistor tétrode

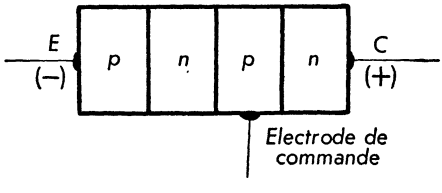


Fig. 2-60. — Thyrator

Un bâtonnet de germanium type *n* de 0,5 mm de diamètre (fig. 2-58) possède un goulot d'étranglement de diamètre 50 μ obtenu par usinage électrolytique sur lequel on réalise un dépôt électrolytique d'indium.

Le collecteur étant polarisé positivement par rapport à l'émetteur un courant circule dans le sens collecteur-émetteur. En polarisant plus ou moins négativement la base on crée un champ plus ou moins intense dans le goulot permettant de contrôler le courant. Il peut être utilisé jusqu'à 1 000 MHz.

(1) L'Alcatron (C.S.F.) est un dispositif à semi-conducteurs à effet de champ dont le fonctionnement est apparenté à celui d'une pentode.

4° Transistor tétrode.

Dans ce type on dispose une seconde électrode sur la base (fig. 2-59) polarisée négativement. Le champ électrique négatif créé à la partie supérieure de la base comprime les électrons injectés par l'émetteur dans la partie inférieure de la base. Il en résulte une résistance de base faible (50 Ω), une réduction des capacités entre base et émetteur-collecteur qui permettent un emploi à des fréquences plus élevées jusqu'à 60 MHz. Les transistors tétrode sont obtenus par tirage et diffusion.

5° Thyrator ou redresseur à électrode de commande.

Il est constitué par deux jonctions *n-p* successives (fig. 2-60).

C'est un redresseur de puissance au silicium dans lequel le passage du courant direct ne peut être obtenu que grâce à l'application d'un signal de commande sur la troisième électrode prévue à cet effet. Une fois le phénomène de conduction amorcé, l'électrode de commande n'a plus d'action de contrôle. Le thyrator ne peut reprendre son état initial qu'en réduisant le courant anodique en dessous d'une valeur critique appelée « courant d'entretien ».

6° Transistor à couche intrinsèque.

En interposant entre base et collecteur une couche de germanium pur on obtient un transistron *p n i p*. Elle permet la réduction de la capacité collecteur-base tout en augmentant la tension collecteur d'où possibilité de travailler à des fréquences plus élevées. Le transistor « Drift » est un transistor *p n i p* dont la base est à répartition exponentielle d'impuretés.

7° Transistor à barrière de surface.

C'est un transistor dont la base est réduite à quelques μ par usinage électrolytique de germanium type *n*. Des pellicules très faibles d'indium sont déposées par électrolyse et formeront l'émetteur et le collecteur. La fréquence atteint 60 MHz mais avec une puissance faible.

Le transistor « Madt » est dérivé du précédent. Il possède une base à répartition exponentielle d'impuretés et permet d'atteindre 1 000 MHz.

8° Transistor unijonction.

On peut le considérer comme une diode possédant deux contacts de base. La caractéristique V_E (I_E) possède une partie à pente négative d'où l'utilisation comme oscillateurs à relaxation, générateurs d'impulsions, commande de thyrators.

9° Eléments micrologiques " Planar ".

Ce sont des éléments fonctionnels où transistors et résistances sont diffusés dans un unique bloc de silicium monolithique. Ils sont utilisés dans la fabrication des calculateurs logiques. Leurs avantages principaux sont la réduction d'encombrement considérable et leur fiabilité exceptionnelle.

B - Fabrication.

Les semi-conducteurs utilisés actuellement sont le germanium et le silicium (1) avec des impuretés trivalentes (Al - Ga - In) pour l'obtention du type *p* et des impuretés pentavalentes (P - As - Sb) pour le type *n*.

Pour obtenir les jonctions plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Nous décrirons plus particulièrement la première qui est utilisée pour la fabrication des transistors de type courant.

1° Transistors à jonctions obtenues par alliage.

Description de la fabrication d'un transistor au germanium du type *p - n - p* (fig. 2-61 à 2-64).

— Tirage d'un monocristal (voir Tome I chapitre 5).

— Découpage de plaquettes de germanium du type *n* (voir § III C du présent chapitre).

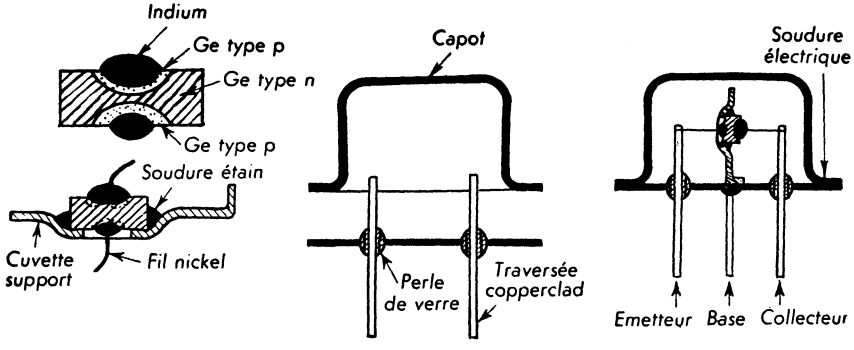


Fig. 2-61 à Fig. 2-64. — Transistors : fabrication

— Mise en position dans un gabarit spécial des éléments des deux jonctions (sphérules d'indium (2) et pastille de germanium) ainsi que d'une languette qui sera soudée à la pastille de germanium. Ce travail se fait dans une hotte anti-poussière afin d'éviter tout risque de pollution.

— Obtention des jonctions après alliage intime de l'indium au germanium par chauffage dans un four en atmosphère réductrice (fig. 2-61).

— Préparation de l'enveloppe tout verre ou métallique avec traversées copperclad et perles de verre (fig. 2-63).

— Soudure sur chaque hémisphère d'indium d'un fil de nickel de 0,15 mm de diamètre.

(1) La Société Westinghouse vient de lancer des types nouveaux au carbure de silicium de type *n* avec diffusion d'aluminium pour obtenir le type *p*. Ces transistors fonctionnent parfaitement jusqu'à 350°C.

(2) La sphérule d'indium du collecteur est plus grosse que celle de l'émetteur donnant une surface de jonction collecteur plus grande.

— Soudure de la languette et des fils précédents sur les fils de sortie.
— Décapage, lavage.
— Fermeture de l'enveloppe sous atmosphère sèche : capot métallique soudé électriquement (fig. 2-64) ou pied en verre soudé sur l'enveloppe verre (fig. 2.65).
— Etuvage, contrôle, essais et tri automatique des transistors.

Remarque : La fabrication des transistors est d'une minutie extrême : sphérules d'indium de quelques dixièmes de mm, tolérances de quelques μ sur le diamètre des fils de connexions, etc. Les opérations d'assemblage doivent être effectuées sous binoculaire. De nombreux contrôles sont pratiqués à tous les stades sans cesser d'observer une propreté méticuleuse.

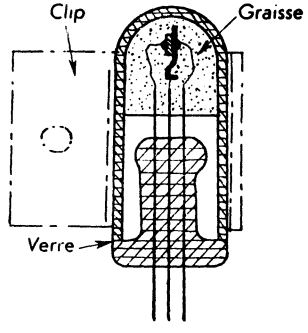


Fig. 2-65

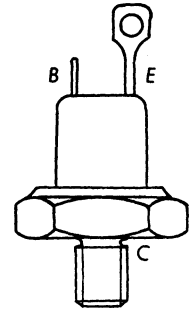


Fig. 2-66

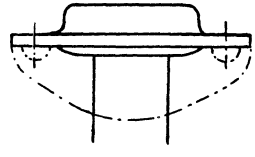


Fig. 2-67

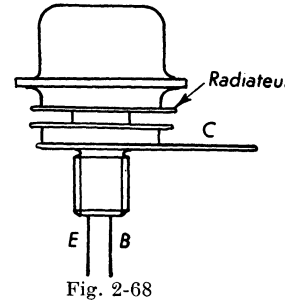


Fig. 2-68

Différents modèles de transistors

2° Transistors à jonctions obtenues par tirage.

Cette méthode consiste à faire croître le monocristal à partir d'un bain contenant deux types d'impuretés. En procédant à des réchauffages et refroidissements successifs pendant la croissance on obtient des concentrations d'impuretés variables. Un découpage convenable permet d'obtenir des jonctions *p n p* ou *n p n*.

La difficulté dans cette méthode est de réaliser la connexion de base. La capacité est plus faible mais les courants admissibles sont plus réduits.

3° Transistors à jonctions obtenues par diffusion.

Sur une plaquette de germanium de type *p* on diffuse dans une mince couche superficielle (quelques μ) une impureté de type *n*. Cette diffusion s'opère dans une enceinte en quartz chauffée par induction. Un courant de gaz inerte amène en contact avec le semi-conducteur les vapeurs produites par la vaporisation des impuretés. C'est sur cette mince couche constituant la base que sera déposée la couche formant l'émetteur.

Cette méthode utilisée pour la fabrication des transistors *p n p* type « Mesa » ou des transistors à effet de champ permet d'obtenir des fréquences de coupure plus élevées par réduction de l'épaisseur de la base (capacité base-émetteur plus faibles) et des puissances élevées par augmentation des surfaces de jonction.

C - Différents modèles.

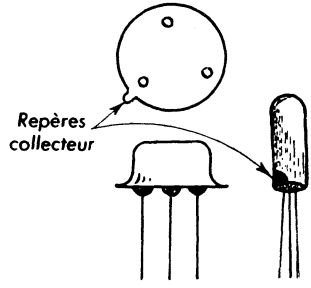


Fig. 2-69 et 2-70

— Transistors ordinaires :
Sortie par fils sous enveloppe verre (fig. 2-65 et 2-70).
Sorties par fils sous boîtier métallique (fig. 2-64 et 2-69).

— Transistors de puissance :
Fixation centrale par filetage (fig. 2-66 et 2-68).
Fixation latérale.

— Thyrators :
Fixation latérale (fig. 2-67).

— Refroidissement : Il est réalisé par convection sur les transistors de petite et moyenne puissance et par conduction sur les transistors de forte puissance.

La protection contre la chaleur peut être obtenue sur les transistors ordinaires au moyen d'un clip en cuivre (fig. 2-65) ou sur les transistors de puissance en réunissant le collecteur au boîtier qui sert de radiateur thermique et évacue la chaleur au châssis (fig. 2-66 à 2-68).

D - Caractéristiques.

1° Caractéristiques I_C V_{CE} émetteur commun.

Leur linéarité permet d'amplifier sans déformation en utilisant presque toute la longueur de la droite de charge expliquant ainsi le rendement élevé.

Bien que l'amplification en tension soit légèrement inférieure à l'unité, la résistance d'entrée étant de 1 000 Ω environ et la résistance de sortie de 30 000 Ω dans le montage à émetteur commun, le gain en puissance est important (20 dB).

Le gain en courant atteint 50.

Il existe 3 types de montages : base commune, émetteur commun et collecteur commun.

2° Caractéristiques en paramètres h.

En plus des caractéristiques habituelles, les constructeurs donnent les paramètres « h » ou paramètres hybrides qui caractérisent le comportement du transistor à faible niveau.

h_{11} : résistance d'entrée (sortie en court-circuit);
h_{12} : taux de réaction en tension (entrée à vide);
h_{21} : gain en courant (sortie en court-circuit);
h_{22} : admittance de sortie (entrée à vide)

Les paramètres « h » sont liés aux grandeurs d'entrée (indice 1) et de sortie (indice 2) par les relations suivantes :

$$V_1 = h_{11} I_1 + h_{12} V_2$$
$$I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} V_2$$

3° Fréquence de coupure.

C'est la fréquence limite d'utilisation pour laquelle l'amplification de courant tombe à $1/\sqrt{2}$ de sa valeur en basse fréquence, ce qui correspond à un affaiblissement de 3 dB.

Elle est généralement indiquée pour le montage à base commune.

Elle a pour valeur approximative suivant les types :

1 MHz : transistors B.F.
10 MHz : transistors H.F.
100 MHz : transistors tétrodes, *p n i p*, à base mince diffusée, à champ interne.
1 000 MHz : technétron.

Les transistors pour H.F. sont obtenus en réduisant les capacités base-collecteur et base-émetteur. On l'obtient en diminuant l'épaisseur de la base et la surface des jonctions.

4° Puissance dissipée maximale (à 25 °C).

Elle dépend évidemment des types considérés. Les limites permises actuellement sont :

50 W pour les transistors B.F. au germanium.
80 W pour les transistors H.F. au silicium.

Récemment ces puissances ont été portées respectivement à 300 W pour les transistors au silicium en basse fréquence.

On peut accroître la puissance dissipée en augmentant la densité d'impuretés. Il faut pour cela utiliser des impuretés (Al, Ga, B) plus solubles dans le germanium que ne l'est l'indium.

5° Température maximale d'utilisation.

Elle est d'environ 100 °C pour les transistors au germanium et 200 °C pour ceux au silicium.

Pour augmenter cette limite les recherches s'orientent vers des semi-conducteurs plus réfractaires tels que le carbure de silicium déjà signalé (350 °C).

E - Applications.

Les transistors peuvent remplir toutes les fonctions des tubes électroniques aux petites puissances.

Par rapport aux tubes électroniques ils réunissent les avantages suivants :

— Encombrement très réduit.
— Très faible consommation.
— Durée de vie extraordinaire (100 000 heures).
— Grande résistance aux chocs et aux pressions.
— Simplicité des montages.

Les limites de puissance, de fréquence de température sont reculées constamment par l'évolution de la technique et les transistors voient s'étendre leur champ d'applications.

Sans entrer dans le détail des multiples applications nous pouvons mentionner les domaines où le transistor est roi :

— les radiorécepteurs portatifs;
— les appareils de prothèse auditive;

et ceux où il est en pleine expansion :

— télévision;
— machines à calculer électroniques.

Le domaine des thyrators au silicium semble prometteur puisqu'ils permettent de commander un courant de 15 A (et même 50 A plus récemment) avec un courant de 30 mA pour une tension inverse de 400 V.

VI. CODE.

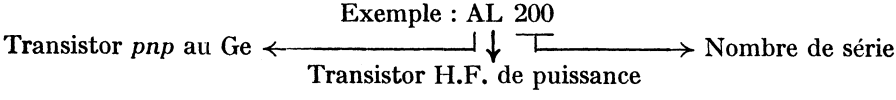
Bien qu'actuellement aucun code ne soit normalisé pour l'appellation des dispositifs à semi-conducteurs nous donnerons celui qui tend à s'imposer et qui est utilisé par Philips ainsi que par les fabricants allemands (Siemens, Téléfunken, Valvo).

Les semi-conducteurs d'usage courant sont désignés par deux lettres suivies de trois chiffres.

Les semi-conducteurs pour usage professionnel sont désignés par trois lettres suivies de deux chiffres.

La signification des lettres est la même dans les deux cas.

1re lettre	2e lettre	Groupe final
type	fonction	Nombre de série
A Diodes au Ge Transistors *pnp* au Ge B Diodes au Si Transistors *pnp* au Si N Transistors *npn* au Ge M Transistors *npn* au Si	A Diodes et varicaps C Transistors BF de faible P D Transistors BF de P F Transistors HF de faible P L Transistors HF de P P Photodiodes S Transistors de commutation T Thyrators Y Redresseurs de P Z Diodes régulatrices	3 chiffres : usage courant 1 lettre et 2 chiffres : usage professionnel



VII. NORMES.

UTE C 53-210 : Eléments redresseurs et groupes redresseurs à semi-conducteurs polycristallins (1962).

SITELESC-313 : Symboles littéraux pour les dispositifs à semi-conducteurs (1961) (1).

SITELESC-314 : Symboles graphiques pour les dispositifs à semi-conducteurs (1961).

FNIE 031 : Recommandations relatives à l'utilisation des dispositifs à semiconducteurs (1962).

CCTU 13-01 : Transistors à jonction (1961).

CCTU 13-02 : Diodes à pointes (1961).

CCTU 13-03 : Diodes régulatrices de puissance (1962).

CCTU 13-04 : Diodes de redresssement (1962).

(1) Les spécifications syndicales SITELESC ou FNIE sont éditées par la SDSA, 23, rue de Lübeck, Paris (16e).

CHAPITRE 3

BOBINAGES B.F.

I. GÉNÉRALITÉS.

A - Définitions.

Bobinage ou enroulement : Ensemble de conducteurs formant un même circuit électrique dans un appareil ou une machine électrique.

Spire : Partie élémentaire d'un enroulement dont les extrémités sont, en général, très rapprochées l'une de l'autre.

Couche : Ensemble de conducteurs situés à une même distance de l'axe du bobinage.

Nombre de couches : Nombre de spires concentriques superposées perpendiculairement à l'axe de la bobine.

Transformateur : Appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs autres systèmes de courants variables d'intensité et de tension généralement différentes et de même fréquence.

Transformateur cuirassé : Transformateur dont le paquet de tôles constituant le noyau entoure les enroulements et les enferme généralement presque entièrement.

Autotransformateur : Transformateur dans lequel les enroulements primaire et secondaire ont des parties communes.

Transformateur à courant constant : Transformateur établi pour maintenir un courant secondaire sensiblement constant entre des limites de fonctionnement définies, quelles que soient les variations de l'impédance du circuit secondaire ou de la tension appliquée à l'enroulement primaire.

Enroulement primaire : Enroulement qui reçoit la puissance active. Un transformateur peut comporter plusieurs enroulements primaires.

Enroulement secondaire : Enroulement aux bornes duquel on relie un circuit d'utilisation. Un transformateur peut comporter plusieurs enroulements secondaires.

Enroulement tertiaire : Enroulement supplémentaire d'un transformateur destiné à être relié à un condensateur, à une bobine d'inductance, à un circuit auxiliaire, etc.

Enroulements concentriques : Disposition des enroulements d'un transformateur dans laquelle le primaire et le secondaire et, éventuellement le tertiaire, placés sur le même noyau, ont la forme de cylindres concentriques.

Enroulements alternés : Disposition des enroulements d'un transformateur dans laquelle le primaire et le secondaire et, éventuellement, le tertiaire, sont subdivisés en galettes alternées sur le même noyau.

Rapport de transformation : Rapport des tensions des enroulements haute et basse tension ou rapport des courants des enroulements haute et basse tension d'un transformateur dans des conditions déterminées.

Circuit magnétique : Ensemble de milieux comprenant principalement des substances ferro-magnétiques constituant un circuit fermé et pouvant être le siège d'un flux d'induction magnétique.

Noyau magnétique : Partie d'un circuit magnétique entourée d'un enroulement.

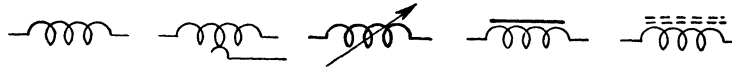


Fig. 3-1 Fig. 3-2 Fig. 3-3 Fig. 3-4 Fig. 3-5

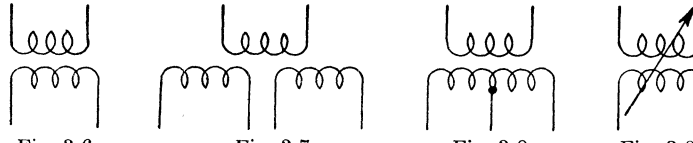


Fig. 3-6 Fig. 3-7 Fig. 3-8 Fig. 3-9

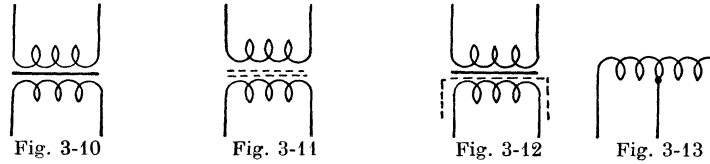


Fig. 3-10 Fig. 3-11 Fig. 3-12 Fig. 3-13

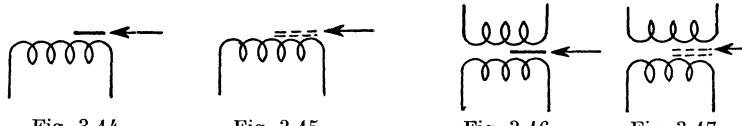


Fig. 3-14 Fig. 3-15 Fig. 3-16 Fig. 3-17

Culasse : Pièce de substance ferromagnétique non entourée d'enroulements, et destinée à relier les noyaux d'un électro-aimant ou d'un transformateur ou les pôles d'une machine.

Carcasse : Pièce ou ensemble de pièces soutenant les organes d'une machine et en formant la charpente.

Entrefer : Interruption de faible longueur de la partie ferromagnétique d'un circuit magnétique.

Inductance : Appareil dont on utilise principalement l'inductance.

B - Représentation schématique (NF C 03-390).

L'ensemble des symboles d'inductances et de transformateurs utilisés aussi bien en B.F. qu'en H.F. sont donnés aux figures suivantes :

fig. 3-1 Inductance ou bobine de réactance. Symbole général,
fig. 3-2 Inductance réglable par contact glissant ou par curseur,
fig. 3-3 Inductance réglable sans interruption de service
fig. 3-4 Inductance à noyau ferromagnétique,
fig. 3-5 Inductance à noyau aggloméré,
fig. 3-6 Transformateur : Symbole général,
fig. 3-7 Transformateur à 3 enroulements,
fig. 3-8 Transformateur différentiel,
fig. 3-9 Transformateur réglable,
fig. 3-10 Transformateur à noyau ferromagnétique,
fig. 3-11 Transformateur à noyau aggloméré,
fig. 3-12 Transformateur à écran,
fig. 3-13 Autotransformateur.

Les quatre symboles suivants (fig. 3-14 à 3-17) non normalisés représentent des inductances ou transformateurs à noyau ferromagnétique ou noyau aggloméré réglables.

C - Identification.

1° Le type : Transformateur d'alimentation, transformateur B.F. de tension, transformateur B.F. de puissance, inductance B.F. pour filtre, etc.

2° Le modèle : Il est caractérisé par la forme générale et les dimensions.

3° La catégorie : Elle est définie par les essais climatiques.

4° Les caractéristiques : Elles sont différentes suivant le type et nous les mentionnerons aux paragraphes correspondants.

D - Matériaux [1].

1° Conducteurs.

Le cuivre électrolytique est universellement adopté pour ses qualités : excellentes conductibilités électrique et thermique, encombrement faible, prix acceptable. La résistivité est comprise entre 1,74 et 1,81 $\mu\,\Omega$ cm. Le diamètre des fils de bobinages utilisés en radio-électricité va de 0,04 mm à 1 mm.

[1] Revoir l'étude des matériaux détaillée dans le tome I.

2° Circuits magnétiques.

L'évolution de la qualité des alliages pour circuits magnétiques a été conditionnée par la diminution des pertes (hystérésis et courants de Foucault) et par la recherche de perméabilités de plus en plus grandes.

a) Nature.

Aciers au silicium :

— Transformateurs d'alimentation industriels ordinaires :

Tôles de qualité supérieure (Si < 3 %).

Les pertes sont comprises entre 1,6 et 2,5 W/kg pour un tesla à 50 Hz.

— Transformateurs d'alimentation radioélectriques et inductances de filtrage :

Tôles extra-supérieures (Si > 3 %).

Elles sont normalisées et les pertes doivent être inférieures à 1,6 W/kg pour un tesla à 50 Hz.

— Transformateurs d'alimentation et inductances à faible encombrement :

Tôles à cristaux orientés (Imphysil).

Aciers au nickel :

— Transformateurs A.F. à large bande, inductances A.F., blindages magnétiques, pick-up magnétiques :

Mumétal et Mumétal au molybdène.

— Transformateurs de liaison ou d'adaptation A.F., inductances A.F. :

Anhyster C et D à cristaux orientés.

— Transformateurs de blocking ou d'impulsions :

Anhyster B.

— Transformateurs A.F. sans distorsion pour haute fidélité :

Permivar, Isoperm.

b) Qualités des tôles [1].

Elles doivent être livrées par les fabricants en feuilles (1 m $\times$ 2 m) ou en rouleaux avec des surfaces unies, propres et exemptes de rouille ainsi que de tous défauts tels que stries, soufflures, criques, rugosités. Les feuilles ne doivent pas présenter d'ondulations non développables, ni de tensions internes nuisibles à la qualité du découpage ou rendant impossible l'obtention d'un profil suffisamment régulier.

Les tôles sont livrées décapées ou non. Dans ce cas la couche d'oxyde (calamine) doit être parfaitement adhérente de façon à ne pas se détacher par suite d'opérations d'isolation ou de découpage.

Les tôles à cristaux orientés de qualité X sont livrées avec, sur les deux faces, une isolation spéciale (carlite) obtenue par un traitement thermochimique à base de phosphate de magnésie (épaisseur 1 μ environ). Il est néccessaire d'effectuer sur ces tôles un recuit à 800 °C en atmosphère d'azote où d'hydrogène après découpage.

[1] Normes NF C 28-900, C 28-910, C 28-920.

Les qualités normalisées sont désignées par l'appellation « tôles pour transformateurs » suivie d'une symbolisation. Elles sont données dans le tableau ci-dessous qui mentionne les épaisseurs correspondantes et les pertes totales maximales en watts par kilogramme.

Le poids spécifique nominal à admettre dans les calculs est de 74,5 N/dm³ pour les tôles usuelles et de 75,7 N/dm³ pour les tôles à cristaux orientés.

TABLEAU 3-1 — TOLES POUR CIRCUITS MAGNÉTIQUES

TOLES USUELLES en feuilles ou en rouleaux						
Qualités	93	100	110	120	130	160
Epaisseurs nominales (mm)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,5
Pertes en W/kg à 1 T	0,93	1	1,1	1,2	1,3	1,6
TOLES A CRISTAUX ORIENTÉS qualité X : feuilles ou rouleaux qualité W : toujours rouleaux						
Qualités	M6W	M7W	M8W	M6X	M7X	M8X
Epaisseurs nominales (mm)	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,35
Pertes en W/kg à 1 T	0,49	0,56	0,6	0,5	0,55	0,62

c) Essais.

— *Contrôle des épaisseurs* : Elles ne doivent pas s'écarter de ± 10 % de l'épaisseur nominale.

— *Essai de foisonnement* : Il permet de vérifier la planéité des tôles en mesurant le volume de 100 carrés de 100 mm de côté comprimés sous une pression de 100 N/cm². En multipliant ce volume par le poids spécifique nominal on obtient le poids fictif. Le rapport du poids réel au poids fictif donne le coefficient de foisonnement (0,92 pour les tôles décapées).

— *Mesure des pertes* : Elles sont mesurées à l'aide d'un appareil spécial (appareil Epstein) sous un courant alternatif 50 Hz pour une induction de 1 tesla (ou 1,5 tesla).

— *Essai de pliages* : Il est effectué à l'aide d'un appareil spécial qui permet de plier l'éprouvette à 90° alternativement de chaque côté de sa position initiale. Au premier pliage on vérifie l'adhérence de la couche de calamine qui ne doit, ni se décoller, ni se fissurer. La tôle a des qualités

mécaniques satisfaisantes si le nombre de pliages est supérieur à 1,5 ou 2 avant la rupture complète.

— *Mesure des inductions en fonction de H* : Les mesures se font à 5, 10, 25, 50, 100 A/m à l'aide du perméamètre Iliovici. Les valeurs minimales admises sont indiquées dans les spécifications particulières. (Mesure à 800 A/m pour les tôles à cristaux orientés).

— *Aptitude au découpage* : Les tôles doivent être découpées aux formes habituelles sans éclater, ni se fissurer aux bords du cisaillement ou au long des cristaux.

3° Isolants.

a) Isolants de fils.

Actuellement on utilise presque exclusivement des vernis synthétiques. Pour les bobinages statiques, les plus utilisés sont les résines phénol-formaldéhyde (Classe E, 120 °C), les résines époxy ou les polyuréthanes (Classe B, 130 °C). Ces derniers ont l'avantage d'être autosoudables c'est-à-dire qu'ils peuvent être décapés au bain d'étain à 370 °C environ.

Les fils émaillés sont moins hygroscopiques et ont un encombrement plus faible que les fils guipés coton ou soie. Néanmoins en matériel professionnel on trouve du fil isolé par deux couches soie ou une couche émail plus une couche soie donnant un isolement plus sûr.

b) Isolants entre couches.

Les papiers calibrés, huilés utilisés augmentent la rigidité diélectrique et assurent la régularité mécanique du bobinage (Papiers Kraft électrique, Presspahn, Cristal).

Les différents enroulements sont isolés par plusieurs épaisseurs de papier ou par une bande de toile huilée. La dimension des papiers doit être prévue de telle façon qu'ils dépassent de 5 à 6 mm les côtés du bobinage.

c) Carcasse.

Le plus souvent elle est en carton presspahn. Celle de petits transformateurs BF pour récepteurs à transistors ou transformateurs de blocking pour téléviseurs peut être moulée en superpolyamides (Rilsan, Nylon).

d) Isolant entre tôles.

Pour éviter la circulation des courants de Foucault, les tôles du circuit magnétique doivent être parfaitement isolées entre elles. Dans les petits transformateurs c'est la pellicule de calamine qui permet l'isolement.

Dans les transformateurs d'alimentation importants on améliore l'isolement par collage d'une mince feuille de papier de soie sur chaque tôle. Les tôles à cristaux orientés de la qualité X comportent en plus de la pellicule d'oxyde une couche de vernis spécial.

e) Imprégnation.

Les transformateurs de haute qualité sont imprégnés sous pression après séchage préalable. On emploie l'ozokérite ou des vernis formophénoliques.

E - Machines à bobiner.

Le principe général des machines à bobiner est le suivant (fig. 3-18). La carcasse montée sur un mandrin est entraînée en rotation par une broche.

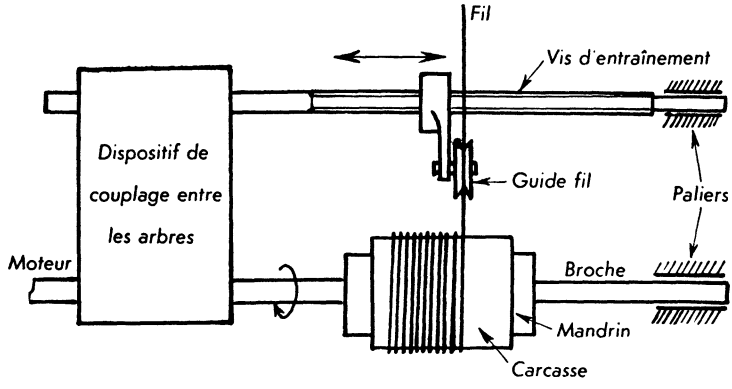


Fig. 3-18 — Machine à bobiner

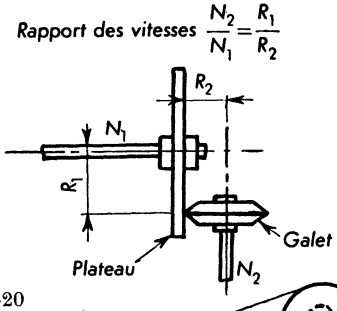


Fig. 3-20
Variateur de vitesses

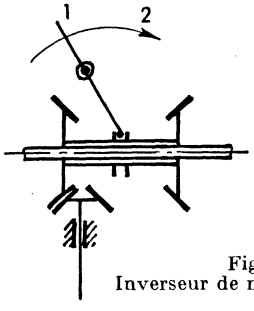


Fig.3-19
Inverseur de marche

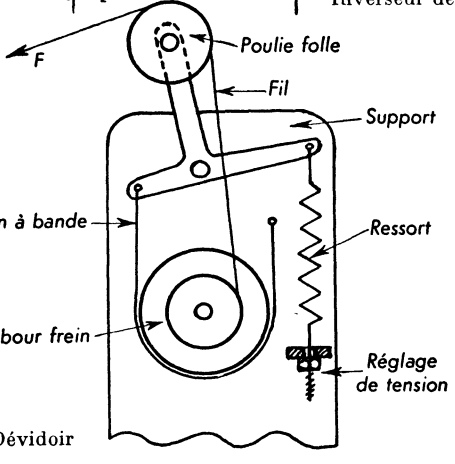


Fig. 3-21. — Dévidoir

Machine à bobiner

Le fil est déplacé à chaque tour par le guide fil d'une quantité égale au pas de l'enroulement c'est-à-dire au diamètre du fil. Le déplacement du guide fil est réalisé au moyen d'une vis dont le sens de rotation est inversé automatiquement à chaque couche par un système de butées réglables.

L'inverseur de marche est à engrenages. Un des procédés utilisé est représenté à la figure 3-19. Le déplacement du manchon comportant deux pignons coniques permet d'inverser le sens de rotation en passant de la position 1 à la position 2.

Quant au réglage de l'avance en fonction du diamètre du fil, il peut être obtenu par un variateur de vitesses à roues de friction (fig. 3-20). Le déplacement du galet en caoutchouc ou en cuir permet de modifier le rayon R_1 c'est-à-dire le rapport de vitesses.

Le dévidoir sur lequel est monté la bobine de fil, doit permettre le déroulement sous une tension constante. On y parvient au moyen d'un levier articulé commandant le degré de freinage d'un frein à bande et rappelé par un ressort de tension réglable (fig. 3-21).

La bobine est serrée sur l'axe entre des cônes d'entraînement.

La machine comporte un compte-tours qui peut commander l'arrêt en fin de bobinage.

II. TRANSFORMATEURS D'ALIMENTATION.

A - Calcul simplifié d'un transformateur.

1° Rapport de transformation.

Si N_1, U_1, N_2, U_2 sont les nombres de spires et les tensions au primaire et au secondaire le rapport de transformation est :

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}. \qquad \text{(fig. 3-22).}$$

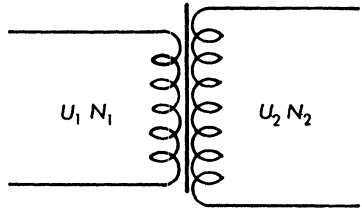


Fig. 3-22. — Transformateur

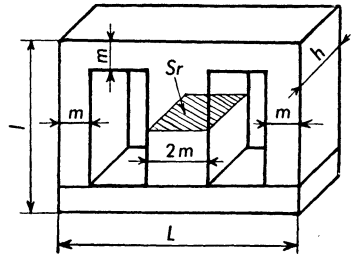


Fig. 3-23. — Circuit magnétique

2° Section du noyau (fig. 3-23).

Calculer la puissance nécessaire au secondaire P_2 en faisant la somme des puissances calculées pour chacun des enroulements secondaires en partant des tensions utilisées et des intensités consommées :

$$P_2 = \Sigma\ U_2\ I_2 \text{ (volts-ampères).}$$

Admettre un rendement moyen de 80 % (1) et calculer la puissance absorbée au primaire soit :

$$P_1 = 1{,}25\ P_2 \text{ (volts-ampères).}$$

La section effective du noyau est donnée par la formule :

$$S_e = 1{,}2\sqrt{P_1}\ (\text{cm}^2).$$

Pour tenir compte du foisonnement on augmente de 10 % environ la section effective pour obtenir la section réelle S_r du noyau :

$$S_r = 1{,}3\sqrt{P_1}\ (\text{cm}^2).$$

A partir de la section S_r on définit les cotes m et h. La section carrée est la plus favorable.

Le nombre de tôles est donné par le rapport $\frac{S_e}{2\ m \cdot e}$, e étant l'épaisseur d'une tôle.

3° Détermination de la section du fil s :

La section s se calcule à partir de la formule : $s = I/D$

s : section en mm²
I : intensité en ampères traversant chaque enroulement
D : densité de courant en A/mm².

La densité de courant adoptée sera comprise entre 2 A/mm² et 4 A/mm². Elle sera choisie d'autant plus faible que la puissance est plus grande (refroidissement plus difficile) et que les conditions de travail du transformateur seront plus dures (service continu, service intermittent).

Choisir ensuite une tôle standard telle que la section de la fenêtre soit environ égale à 4 fois la section totale de cuivre (tenir compte dans ce choix de la cote m déterminée au 2°)

4° Nombre de tours des enroulements.

A partir de la loi fondamentale de l'induction, on peut calculer le nombre de tours N des enroulements. Pour la fréquence 50 Hz et après avoir majoré de 10 % le résultat pour tenir compte des chutes de tension dans les enroulements, on obtient dans le système S I :

$$N = \frac{5\ U}{B \cdot S_e \cdot 10^3}$$

N : nombre de tours
U : tension en volts
B : induction maximale en Wb/m²
S_e : section effective en m²

(1) Prendre un rendement de 90 % pour des tranformateurs de haute qualité avec choix de tôles appropriées et étude particulière de l'isolement.

Pour les transformateurs de qualité courante avec $B_{max} = 1$ Wb/m², on peut adopter la règle suivante : le nombre de spires par volts s'obtient en divisant 50 par la section effective du noyau en cm² soit :

$$\frac{N}{U} = \frac{50}{S_e}.$$

5° Calcul du rendement.

a) Pertes dans le cuivre :

$$P_c = \Sigma\, RI^2 \quad \text{(watts)}.$$

Elles sont égales à la somme des pertes par effet Joule dans chaque enroulement. (Pour un secondaire à point milieu, prendre la moitié des spires).

La résistance de chaque enroulement est calculée d'après la formule $R = \rho\, l/s$, la longueur l étant égale à la longueur de la spire moyenne de chaque enroulement multipliée par le nombre de spires.

b) Pertes dans le fer :

$$P_f = kM \quad \text{(watts)}$$

k exprime les pertes en watts par kilogramme et dépend de la qualité des tôles utilisées.

M est la masse du circuit magnétique en kilogrammes.

c) Rendement :

$$r = \frac{P_2}{P_2 + P_c + P_f}.$$

Un transformateur correctement calculé doit avoir un rendement compris entre 0,7 et 0,9.

Si le rendement est inférieur à 0,7, il faut recommencer les calculs en augmentant les sections des conducteurs et des noyaux ou améliorer la qualité des tôles utilisées.

6° Mise en place des enroulements.

A partir des dimensions standard choisies l et L, on vérifie si les enroulements écran (épaisseur 0,3 ou 0,4 mm), carcasse (épaisseur 2 mm, plus jeu 0,5 mm) et isolants peuvent être logés dans les fenêtres du circuit magnétique.

Le nombre de fils par couche s'obtient en divisant la largeur de la carcasse par le diamètre apparent du fil. Ce diamètre est obtenu en majorant le diamètre réel d'une quantité égale à l'épaisseur de l'isolant et en augmentant le résultat obtenu de 10 % pour tenir compte du fait que les spires ne sont pas parfaitement jointives.

Les majorations à adopter sur les diamètres de fils sont :
0,05 mm : vernis émail,
0,12 mm : deux couches soie ou une couche coton.

Les épaisseurs de papier Kraft ou cristal servant à isoler entre elles les diverses couches sont de :

0,08 mm pour $d \leqslant 0,6$
0,12 — — $0,7 \leqslant d \leqslant 0,8$
0,18 — — $0,9 \leqslant d \leqslant 1,2$
0,25 — — $1,25 \leqslant d$
d : diamètre du fil nu en mm.

On placera plusieurs épaisseurs entre l'enroulement de haute tension et l'enroulement de chauffage, ainsi que de chaque côté de l'écran.

Remarques :

1) Dans le cas d'un autotransformateur, le calcul se conduit de la même façon mais en utilisant pour P_1 les valeurs données par les formules suivantes :

$P'_1 = P_2 (1 - U_1/U_1)$ élévateur (fig. 3-24)
$P'_1 = P_2 (1 - U_2/U_2)$ abaisseur (fig. 3-25)

avec dans les deux cas $P_2 = U_2 I_2$.

La section réelle noyau sera donnée par $S_r = 1,3 \sqrt{P'_1}$.

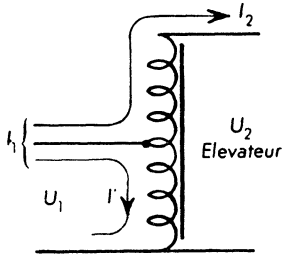


Fig. 3-24

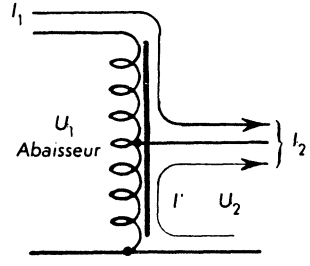


Fig. 3-25

Autotransformateurs

2) Les calculs des transformateurs industriels sont faits au moyen d'abaques permettant de trouver les résultats plus rapidement.

B - Caractéristiques.

1° Résistance en continu des enroulements.

2° Caractéristiques à vide, c'est-à-dire tensions secondaires et courant primaire, quand on applique au primaire la tension et la fréquence nominale avec les secondaires en circuit ouvert.

3° Caractéristiques à pleine charge, c'est-à-dire les tensions primaire et secondaire, ainsi que les courants, mesurés d'après un montage identique à celui d'utilisation et leurs variations en fonction du temps de charge jusqu'à l'équilibre thermique.

4° Pertes à vide.

5° Capacité entre enroulements (éventuellement).

6° Court-circuit : Tous les secondaires étant mis en court-circuit et le primaire étant traversé par le courant de pleine charge, on mesure la tension primaire.

7° Rendement avec puissances en watts.

8° Symétrie des impédances en régime de fonctionnement (pour redresseurs HT).

9° Caractéristique de fréquence.

Les caractéristiques devant figurer pour l'identification sont :
— la fréquence nominale;
— la valeur efficace des tensions nominales des différentes prises de l'enroulement primaire;
— la valeur efficace de la tension nominale et du courant nominal du ou des différents secondaires de chauffage;
— la composante continue de la tension en charge et du courant nominal de l'enroulement à haute tension;
— la puissance consommée ($P = U_1 I_1 \cos \varphi$).

C - Construction.

1° Circuit magnétique.

Il sera établi de façon à ne provoquer que le minimum de rayonnement magnétique, celui-ci pouvant provoquer des ronflements d'induction à 50 Hz dans les éléments situés à proximité du transformateur.

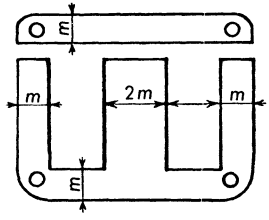


Fig. 3-26
Tôles de transformateurs d'alimentation

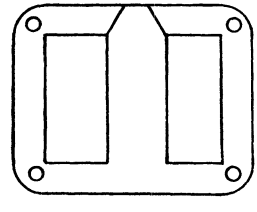


Fig. 3-27

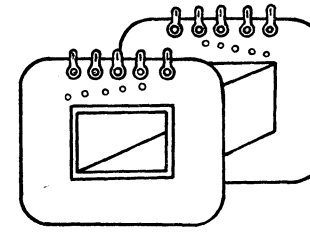


Fig. 3-28.
Carcasse

Pour diminuer le rayonnement il faut utiliser des tôles de qualité supérieure, limiter l'induction maximale et réduire l'entrefer.

Les circuits utilisés sont du type cuirassé avec des profils en *E* et *I* (fig. 3-26). Pour obtenir le minimum d'entrefer, on les enchevêtre au montage (manuellement ou sur machine automatique).

Pour diminuer encore l'entrefer et le rayonnement magnétique qui en résulte on emploie des tôles « bifurquées » (fig. 3-27). La mise en place des enroulements est plus compliquée. Leur prix de revient étant plus élevé, ils sont réservés au matériel professionnel.

Les tôles découpées sur presses mécaniques dans des bandes, ne doivent absolument pas avoir de bavures qui nuiraient au bon isolement entre elles.

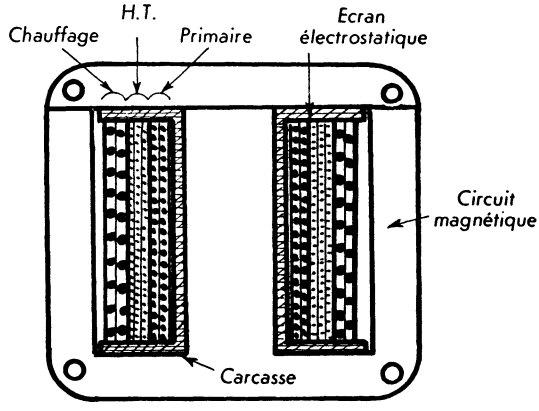


Fig. 3-29. — Montage des enroulements

2° Bobinages.

Ils sont réalisés à spires jointives sur bobineuses qui enroulent le fil sur la carcasse sans (1) ou avec joues (fig. 3-28). Chaque couche est séparée par un papier isolant ainsi que chaque enroulement. Dans les transformateurs d'alimentation, les bobinages sont concentriques (fig. 3-29).

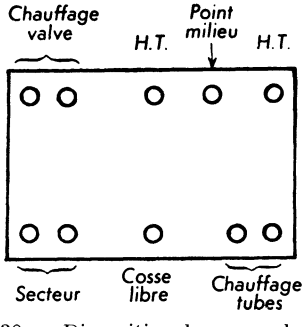


Fig. 3-30. — Disposition des cosses de sortie

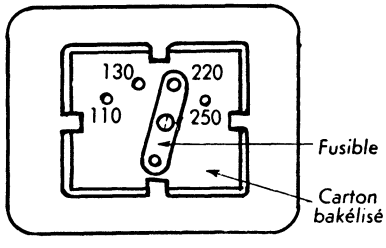


Fig. 3-31. — Répartiteur

(1) Les carcasses sans joues permettent un meilleur refroidissement mais les spires d'extrémité ne sont pas maintenues et l'isolement est moins sûr.

Les sorties se font sur cosses. La disposition normalisée est représentée à la figure 3-30.

Une plaquette en carton bakélisé appelée répartiteur comporte des douilles qui permettent d'adapter le primaire à la tension du secteur au moyen du fusible (fig. 3-31).

3° Ecran électrostatique.

Il est constitué par une couche de fil isolé dont une extrémité est reliée à la masse ou par une mince feuille de laiton ou de cuivre réunie à la masse par un fil soudé. L'écran placé entre primaire et secondaire est isolé des enroulements par du papier ou de la toile. Les deux extrémités doivent être isolées entre elles de façon à ne pas former une spire en court-circuit.

Le but de l'écran est d'éviter la transmission des courants parasites du secteur au secondaire, par l'intermédiaire de la capacité entre les enroulements.

4° Assemblage.

Les tôles du circuit magnétique sont serrées par quatre tiges filetées non isolées dans les petits transformateurs. Les écrous freinés doivent être énergiquement serrés de façon à éviter les vibrations.

La présentation extérieure diffère beaucoup suivant les types (voir § D).

Pour éliminer le rayonnement à l'extérieur on les entoure d'un blindage magnétique à forte perméabilité magnétique tel que le Mumétal.

Les transformateurs de puissance supérieure à 1 kW, les transformateurs professionnels sont placés dans des boîtiers étanches remplis d'huile assurant le refroidissement. Le couvercle est soudé et les sorties se font par perles de verre ou de stéatite.

A titre d'exemple un transformateur d'alimentation de type courant est constitué de la façon suivante :

Primaire comportant 5 bornes au répartiteur :

0 V - 110 V , 400 spires , fil 60/100 émaillé
100 V - 125 V , 55 spires , fil 60/100 émaillé
125 V - 220 V , 345 spires , fil 45/100 émaillé
220 V - 245 V , 91 spires , fil 45/100 émaillé

Secondaire comportant 3 enroulements :

5 V - 2 A , 20 spires , fil 100/100 émaillé
6,3 V - 2 A , 24 spires , fil 100/100 émaillé
3 × 325 V - 140 mA, 2 × 1 300 spires , fil 23/100 émaillé

Les demi-enroulements H.T. doivent être parfaitement symétriques pour avoir une tension de ronflement minimale.

D - Classification.

1° D'après les fréquences.

Les transformateurs prévus pour être utilisés à terre ou sur les navires fonctionnent sur 50 Hz. Par contre sur avions on utilise le 400 Hz qui permet d'avoir des transformateurs et des inductances d'un poids 8 fois plus faible environ.

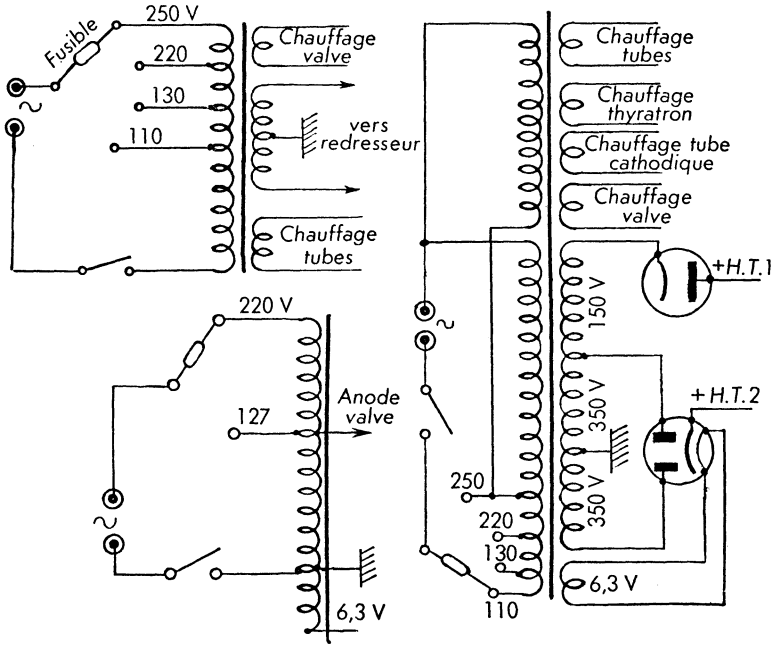


Fig. 3-32 à Fig. 3-34. — Transformateurs d'alimentation

2° D'après le type et le nombre d'enroulements.

Les transformateurs de qualité comportent un enroulement primaire et un ou plusieurs enroulements secondaires (figure 3-32).

Pour des questions d'encombrement de poids ou de prix de revient on peut être amené à utiliser des autotransformateurs (fig. 3-33). Dans ce cas des précautions particulières du point de vue isolement doivent être prises car le secondaire n'est plus isolé du secteur.

a) Primaire.

Il comporte en principe deux bornes pour les tensions normalisées 127-220 V. Les émetteurs de puissance sont alimentés en 380 V entre phases du secteur.

Pour tenir compte des fluctuations de tension du secteur suivant les régions, le primaire comporte des prises 110 - 125 - 140 - 220 - 240 V ou 110 - 130 - 220 - 250 V (fig. 3-32).

Certains transformateurs professionnels comportent des prises à 6 - 0 - 104 - 116 et 128 V permettant d'obtenir l'alimentation sous des tensions de 104, 110, 116, 122, 128 et 134 V.

L'adaptation à la tension du secteur se fait au moyen du fusible.

b) Secondaires.

— *Secondaire de haute tension.* Il comporte 2 sorties si on ne redresse qu'une seule alternance et 3 sorties dont une au milieu de l'enroulement si on redresse les deux alternances.

Les tensions redressées vont de 200 V à 500 V en réception et atteignent 20 kV en émission.

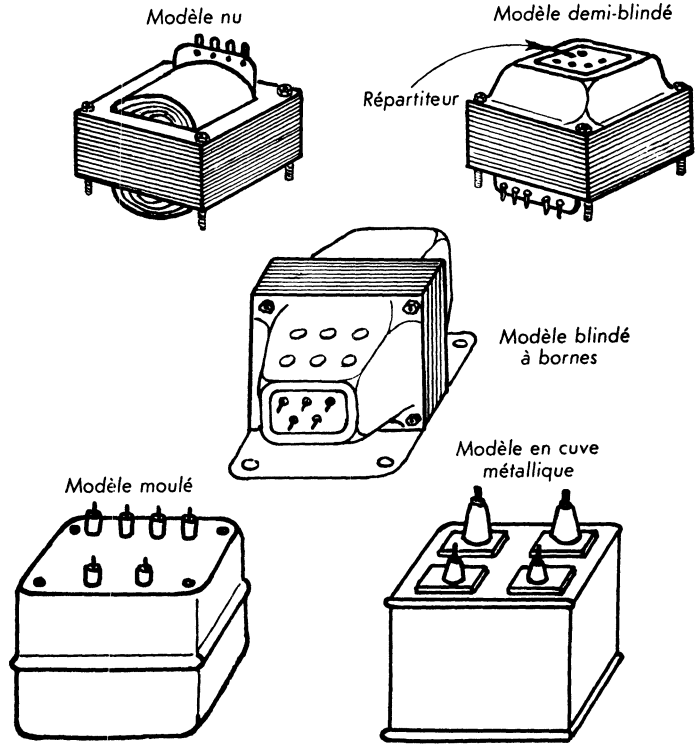


Fig. 3-35 à Fig. 3-39. — Modèles de transformateurs d'alimentation

— *Secondaires de chauffage.* Il peut y avoir un seul enroulement généralement 6,3 V ou deux, l'un servant au chauffage de la valve et l'autre au chauffage des autres tubes. Les transformateurs de qualité comportent un chauffage à point milieu pour diminuer les ronflements.

Des constructions plus complexes peuvent être adoptées en particulier dans les appareils de mesures (fig. 3-34). Les tubes cathodiques d'oscilloscopes demandent des tensions anodiques comprises entre 700 et 3 000 V. Les transformateurs à tension élevée étant délicats à réaliser et coûteux, on préfère souvent utiliser des montages doubleurs de tension.

3° D'après la protection.

a) Modèles nus.

Ils sont fixés au châssis par étrier ou sont encastrés (fig. 3-35). Dans ce cas les connexions se font sous le châssis.

b) Modèles semi-blindés à encastrer (fig. 3-36).

La partie supérieure comporte un capot enveloppant le bobinage, et sur lequel est fixé le répartiteur.

c) Modèles blindés à bornes (fig. 3-37).

Les bornes primaires sont disposées d'un côté du carter et les bornes secondaires de l'autre.

d) Modèles moulés au trempé (aux résines synthétiques) : (fig. 3-38).

Ils sont avec ou sans capot suivant les conditions climatiques exigées. Les sorties se font pas cosses, picots ou boulons.

e) Modèles en cuve métallique étanche (fig. 3-39).

Utilisés en émission ils baignent dans l'huile ou dans un diélectrique synthétique (pyralène) qui assure le refroidissement. Les sorties se font par bornes de stéatite.

III. TRANSFORMATEURS POUR FRÉQUENCES ACOUSTIQUES

A - Calcul simplifié d'un transformateur.

Les transformateurs B.F., à la différence des transformateurs d'alimentation qui sont destinés à élever, ou abaisser une tension, doivent être considérés comme des organes de liaison permettant d'adapter les impédances de deux circuits (1). Le rendement de la transmission d'énergie est maximum lorsque la relation suivante est satisfaite :

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}$$

n : rapport de transformation.
N_1, N_2 : nombre des spires des enroulements primaire et secondaire.
Z_1,Z_2 : impédances des circuits à adapter.

(1) Nous n'examinerons pas ici les calculs relatifs à des cas particuliers de transformateurs BF tels que transformateurs de déphasage, transformateurs d'impulsions.

D'autre part ces transformateurs doivent transmettre une bande de fréquences allant de quelques dizaines de hertz à plusieurs milliers de hertz (au maximum de 20 Hz à 20 kHz).

La transmission des fréquences les plus basses sera d'autant meilleure que l'induction du primaire L_1 sera plus grande. Cependant si L_1 et L_2 sont trop grandes, la capacité répartie augmente d'où pertes plus grandes, nuisibles aux fréquences élevées.

Les calculs complets sont très complexes si l'on fait intervenir tous les facteurs ayant une influence sur la transmission des fréquences. Ils sont grandement facilités industriellement par l'expérience et l'emploi d'abaques. Nous ne donnerons ici qu'une idée des calculs ainsi qu'une méthode simplifiée.

1° Section du noyau.

Elle se calcule de la même façon que pour les transformateurs d'alimentation mais en majorant les sections de 50 % environ pour tenir compte de la transmission des fréquences élevées, ce qui donne :

$$S_r = 2\sqrt{P}$$

P : puissance à transmettre en watts.
S_r : section réelle en cm².

2° Nombre de spires au primaire.

On se donne un affaiblissement maximal à la fréquence la plus basse à transmettre par rapport à 1 000 Hz. Ceci permet de calculer l'inductance minimale.

$$L_1 = \frac{R}{\omega\sqrt{A^2 - 1}}$$

$R = \rho + R_1$: ρ étant la résistance interne de la lampe finale et R_1 la résistance du primaire.

$\omega = 2\pi f$: f étant la fréquence la plus basse à transmettre.

$A = \frac{U_{1000}}{U_f}$: affaiblissement maximal choisi entre 1,1 et 1,4.

Connaissant l'inductance L_1 on peut calculer le nombre de tours au primaire à partir de la formule :

$$L_1 = \frac{\mu N_1^2 S_e}{l} \qquad \text{(système S I).}$$

L_1 : inductance propre en henrys (H);
μ : perméabilité apparente en (H/m) avec $\mu = \mu_0 \mu_r$ et :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

N_1 : nombre de spires au primaire;
S_e : section effective du noyau en m² ($S_e = 0{,}9\ S_r$);
l : longueur moyenne du circuit magnétique en mètre.

S'il y a un entrefer, remplacer l par $(l + \mu e)$, e étant la largeur de l'entrefer.

En réalité la perméabilité du métal à utiliser dépend des intensités continue et alternative qui traversent l'enroulement et sa valeur doit être recherchée dans des tableaux ou sur des graphiques en choisissant des intensités qui correspondent aux conditions normales de fonctionnement.

— *Calcul pratique :*

On peut déterminer approximativement le nombre de spires à l'aide de la relation :

$$N_1 = k \frac{U}{S_e}$$

N_1 : nombre de spires au primaire;

U : tension anodique appliquée au tube qui précède le transformateur en volts;

S_e : section effective du noyau en cm² ($S_e = 0{,}9\ S_r$)

k : 40 à 50 s'il n'existe pas de courant continu traversant le secondaire du transformateur $k = 80$ à 100 dans le cas contraire.

Si le courant continu traversant le primaire est élevé (> 10 mA) le fer est rapidement saturé et il est nécessaire de prévoir un entrefer qui diminue l'inductance (1).

Il en résulte une diminution des phénomènes non linéaires donc de la production d'harmoniques et enfin une meilleure stabilité.

Le calcul théorique permettant de déterminer L doit tenir compte des dimensions de l'entrefer.

3° Nombre de spires au secondaire.

On le calcule au moyen du rapport de transformation à partir des impédances des circuits à adapter. Dans le cas d'un primaire connecté à un push-pull, on prendra pour Z_1 l'impédance de plaque à plaque.

Pour tenir compte des pertes on majore le nombre trouvé de 10 % pour les transformateurs de quelques watts et de 5 % pour des puissances de quelques dizaines de watts et au-dessus.

4° Sections de fils.

Elles se calculent comme pour les transformateurs d'alimentation avec une densité de courant de 2,5 A/mm². L'intensité dont il faut tenir compte est celle du courant continu s'il existe, sinon c'est l'intensité efficace définie par $I = \sqrt{P/Z}$, P étant la puissance B.F. appliquée à l'impédance Z.

(1) L'alimentation en parallèle permet de supprimer le courant continu.

5° Mise en place des enroulements.

Après avoir choisi les dimensions des tôles standards d'après la section du noyau calculé au 1° tout en satisfaisant à la condition $2\ m \leqslant h \leqslant 4\ m$, on vérifie la mise en place des enroulements dans les fenêtres comme pour les transformateurs d'alimentation.

B - Caractéristiques.

1° La résistance en continu des enroulements.

2° Les inductances primaire et secondaire.

3° La bande passante.

4° Distorsion harmonique : taux à la fréquence la plus basse de la bande passante.

5° Symétrie des impédances en fonctionnement dans le cas du passage asymétrique à symétrique.

6° Impédances ramenées au côté utilisation.

7° Rapport de transformation pour les transformateurs B.F. de tension seulement.

8° Puissance utile en watts pour une distorsion harmonique donnée, dans le cas des transformateurs B.F. de puissance.

9° Affaiblissement effectif introduit par le transformateur mesuré à 1 000 Hz et dans les conditions d'emploi pour les transformateurs B.F. de puissance seulement.

C - Construction.

1° Circuit magnétique.

C'est le circuit cuirassé (fig. 3-40) qui est le plus utilisé car plus économique du fait qu'il ne nécessite qu'une bobine.

Le circuit à colonnes (fig. 3-41) est employé dans certains transformateurs professionnels pour ses avantages : faible rayonnement, meilleure forme du point de vue utilisation du circuit magnétique.

Les figures 3-42 et 3-43 montrent d'autres profils pour circuits cuirassés. Les tôles en *E* et *I* sont les plus utilisées. Dans le cas où les enroulements ne sont traversés par aucun courant continu les tôles sont enchevêtrées. Dans le cas contraire, on réalise un entrefer qui réduit l'induction et recule ainsi la saturation. Toutes les tôles en *E* sont groupées du même côté et l'entrefer est constitué par une épaisseur de carton ou de toile vernie (fig. 3-40).

L'utilisation rationnelle des tôles à cristaux orientés, a amené la réalisation de circuits en *C* ou double *C* (fig. 3-44) à partir de bandes de largeur constante découpées dans le sens du laminage.

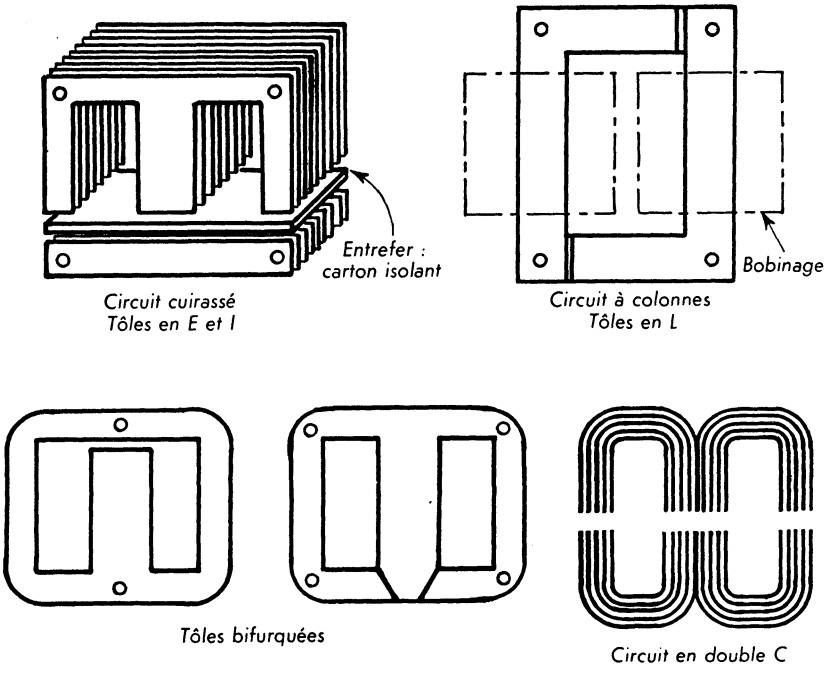


Fig. 3-40 à Fig. 3-44. — Circuits magnétiques de transformateurs B.F.

Les bandes sont roulées en boucles et après recuit sont rendues compactes par imprégnation de résine. Les boucles sont coupées en deux et les tranches sont rectifiées. Les *C* sont serrés sous des efforts appropriés au moyen de clés dynamométriques et reliés par bandes de cerclage et agrafes étamées pour faciliter la soudure sur la bande.

Les matériaux choisis pour la construction des circuits magnétiques doivent avoir une forte perméabilité, de faibles pertes magnétiques et une forte induction de saturation (voir tome I et page 158 tome II).

2° Bobinages.

Ils sont enroulés sur carcasses, avec ou sans joues, en carton presspahn (fig. 3-45) ou en superpolyamides (fig. 3-46) comportant des trous pour le passage des sorties de fils.

Les bobinages sont, soit concentriques, soit alternés. Dans les modèles pour push-pull, la symétrie doit être parfaitement réalisée par bobinage en

sandwich (fig. 3-48) ou en galettes alternées (fig. 3-49). Cette disposition plus onéreuse est aussi utilisée sur les transformateurs de qualité (professionnels, haute fidélité).

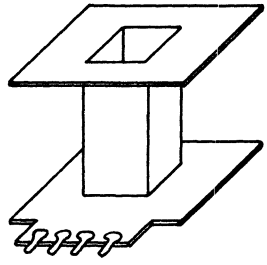


Fig. 3-45
Carcasse en carton

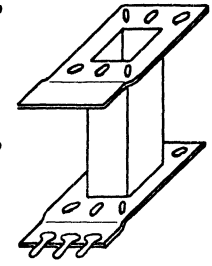


Fig. 3-46
Carcasse en superpolyamide

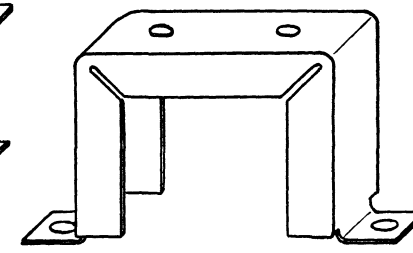


Fig. 3-47
Etrier en tôle d'acier ADx

Le fractionnement des bobines permet de réduire l'inductance de fuite nuisible aux basses fréquences, et la capacité répartie nuisible aux fréquences élevées.

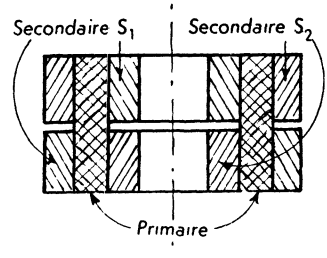


Fig. 3-48

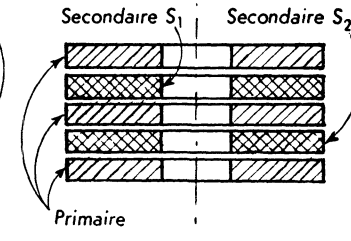


Fig. 3-49

Disposition des enroulements pour transformateurs push-pull

3° Sorties.

Les sorties sont reliées à des cosses serties sur la carcasse ou sur une plaquette de carton bakélisé, fixée sur l'étrier. Les modèles pour circuits imprimés comportent des sorties par picots à l'écartement normalisé et les modèles en boîtiers étanches possèdent des sorties par bornes stéatite ou perles de verre.

Dans le cas de fils fins, les sorties se font par fils spéciaux à plusieurs brins avec isolant renforcé de couleurs différentes permettant de repérer les enroulements.

Le code de repérage des sorties est le suivant :

— primaire : Bleu-rouge (rouge pour le côté H.T. +);
— secondaire : Vert-noir (noir pour le côté masse).

4° Assemblage.

Le serrage des tôles est effectué par 2 ou 4 tiges filetées mais le plus souvent par montage dans un étrier en tôle d'acier doux découpée et pliée (fig. 3-47).

La fixation au châssis se fait généralement par pattes. Toutes les parties métalliques apparentes doivent être protégées contre la rouille par un vernis ou une peinture. Imprégnation : voir § D 2°.

D - Classification.

1° D'après l'emploi.

a) Transformateurs d'entrée (fig. 3-50).

Ce sont des transformateurs élévateurs de tensions destinés à adapter les impédances des microphones à charbon et électrodynamiques ou des lecteurs électrodynamiques à celles des tubes d'entrée. L'élévation de tension est nécessaire pour réduire le rapport souffle/signal de l'étage d'entrée.

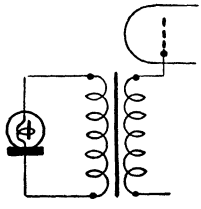


Fig. 3-50

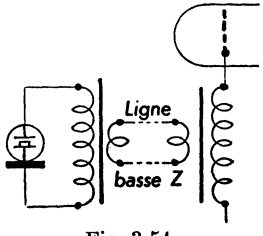


Fig. 3-51

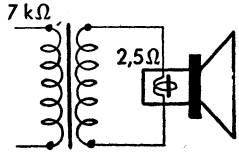


Fig. 3-52

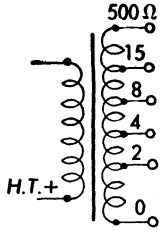


Fig. 3-53

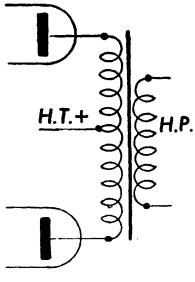


Fig. 3-54

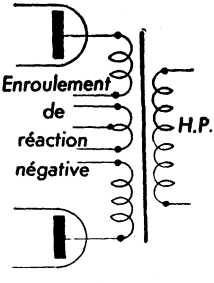


Fig. 3-55

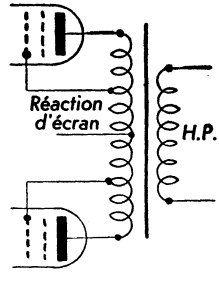


Fig. 3- 56

Lorsqu'on utilise des microphones à faible efficacité (micros à cristal) avec une distance supérieure à 10 m de l'amplificateur on réalise une liaison en basse impédance pour diminuer les pertes en lignes (fig. 3-51). On place un transformateur abaisseur d'impédance près du microphone, et un transformateur élevateur d'impédance près de l'amplificateur.

Ces transformateurs doivent être blindés pour éviter l'influence néfaste des champs extérieurs.

b) Transformateurs de sortie.

Ils servent à adapter l'impédance de charge du tube de sortie à l'impédance de la bobine mobile du haut-parleur (fig. 3-52).

Les impédances primaires standard sont en simple : 2 000 - 2 500 - 3 000 3 500 - 4 500 - 5 200 - 7 000 et 10 000 Ω. En push-pull : 4 000 - 7 000 - 9 000 - 11 000 et 14 000 Ω. Pour transistors : 10 - 15 - 100 - 150 - 200 - 225 - 335 - 510 - 1150.

Les impédances des bobines mobiles de haut-parleurs sont 2,5 — 4 Ω — 8 - 16 - 25 - 50 Ω.

Les puissances nominales sont comprises entre 1 et 100 W (depuis 100 mW pour transistors),

La bande passante d'un transformateur ordinaire varie au maximum de ± 3 d*B* entre 60 Hz et 15 000 Hz, alors que pour un modèle haute fidélité elle ne varie que de ± 1 d*B* de 15 Hz à 40 000 Hz. Les constructeurs donnent pour chaque modèle la caractéristique de fréquence.

Les transformateurs dits « universels » comportent diverses sorties permettant l'adaptation de haut-parleurs différents aux principaux tubes d'amplification B.F. de puissance.

En sonorisation de puissance, des sorties à haute impédance de 100 à 500 Ω permettent la liaison au H.P. jusqu'à 1 km (fig. 3-53). Dans ce cas le H.P. doit être muni d'un transformateur abaisseur d'impédance.

Les modèles pour push-pull (fig. 3-54) ont une prise au point milieu du primaire. Ils ne comportent pas d'entrefer car les courants continus anodiques s'annulent au primaire et ne créent pas d'aimantation permanente.

Les modèles haute fidélité peuvent comporter un enroulement de réaction négative (fig. 3-55) ou mieux des prises intermédiaires pour réaction négative d'écran (fig. 3-56). Pour élargir la bande passante on fractionne les enroulements en galettes minces et on imbrique les enroulements primaire et secondaire. Les fractions de chaque primaire sont reliées en série et les fractions secondaires sont groupées en série, en parallèle ou en série-parallèle selon l'adaptation recherchée.

Pour diminuer les ronflements dus au secteur on munit certains transformateurs de sortie d'une prise intermédiaire spéciale au primaire. Une partie de l'enroulement primaire se trouve incorporée dans le filtre d'alimentation (fig. 3-57).

Tous les transformateurs à prises intermédiaires sont plus délicats à réaliser et reviennent cher.

c) Transformateurs de couplage.

Ils permettent la liaison entre deux étages B.F. d'un amplificateur ou d'un récepteur.

— *Transformateurs de liaison* (fig. 3-58) : avec tubes étant lourds et encombrants, on leur préfère la liaison par résistance-capacité qui par ailleurs donne une meilleure courbe de réponse.

Avec transistors, on les préfère souvent aux liaisons par résistance-capacité car ils permettent un gain en puissance maximum avec une meilleure adaptation des impédances.

— *Transformateurs de déphasage* (fig. 3-59) : Ils permettent d'obtenir deux tensions rigoureusement égales et déphasées de 180° pour l'attaque d'un étage symétrique.

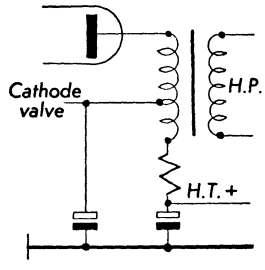


Fig. 3-57

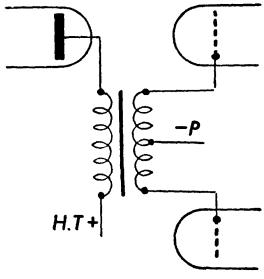


Fig. 3-59

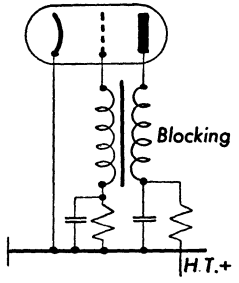


Fig. 3-62

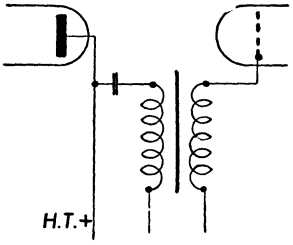


Fig. 3-58

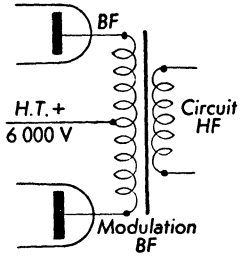


Fig. 3-60

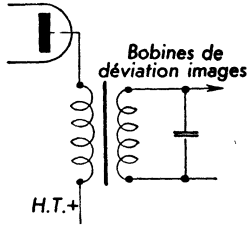


Fig. 3-61

Le rapport de transformation dépend de la classe d'amplification utilisée (1).

Classe A ou AB1 rapport 1/(1,25 + 1,25) ou 1/(2 + 2).
Classe AB2 ou B1 rapport 1/(1 + 1).
Classe B2 rapport 1/(0,3 + 0,3) ou 1/(0,7 + 0,7).

Lorsqu'ils attaquent un étage de puissance fonctionnant avec courant de grille on les appelle transformateurs « driver » (2). La résistance des enroulements secondaires doit être faible.

d) Transformateurs de modulation.

Ils sont utilisés pour moduler la H.F. d'un émetteur par la B.F. (fig. 3-60) ou dans les générateurs H.F. modulés B.F.

Les modèles pour émission sont prévus pour fonctionner avec des courants continus primaire et secondaire importants (quelques ampères à plusieurs dizaines d'ampères) et des tensions continues et efficaces pouvant dépasser

(1) En classe A on utilise plutôt le déphasage par tube pour éviter les inconvénients inhérents aux transformateurs.

(2) Driver = conducteur.

10 kV. Ils sont montés dans des cuves remplies d'huile. Leur circuit magnétique est à colonnes. Ils pèsent quelques kilogrammes à 5 tonnes pour un émetteur de puissance H.F. de 100 kW.

e) Transformateurs de sortie images.

Ils sont utilisés en télévision pour adapter l'impédance de charge du tube de sortie images, à l'impédance des bobines de déviation verticale (fig. 3-61).

Le transformateur doit transmettre sans déformation un signal en dents de scie à la fréquence 50 Hz qui correspond à l'exploration de 50 demi-images par seconde en balayage entrelacé. La linéarité du balayage étant difficile à obtenir on ajoute des systèmes de correction. L'inductance minimale du primaire doit être de 20 henrys.

On emploie des transformateurs (ou autotransformateurs) à entrefer pour éviter la saturation par le courant continu anodique du tube de puissance images. Le rapport de transformation est compris entre 1/10 et 1/30. Leur puissance est fonction de l'angle de déviation utilisé (70° — 90° — 110° — 114°). Ils sont totalement imprégnés pour parfaire l'isolement.

f) Transformateurs de blocking (fig. 3-62).

Ce sont des transformateurs B.F. qui assurent l'entretien des oscillations de relaxation par report d'énergie du circuit d'anode au circuit grille d'un tube oscillateur.

Ils permettent l'obtention de signaux en dents de scie utilisés dans les téléviseurs pour

— le balayage vertical : 50 Hz (trame),
— le balayage horizontal : 20 475 Hz (pour 819 lignes).

Le rapport de transformation est de 1. La capacité du circuit oscillant est constituée par la capacité répartie des bobinages. Le couplage entre L_1 et L_2 doit être aussi serré que possible et le coefficient de surtension suffisamment faible.

2° D'après la protection.

a) Modèles nus.

Les petits transformateurs pour matériel amateur ont leurs enroulements simplement protégés extérieurement par un manchon en carton ou en toile vernie (fig. 3-63 et 3-65).

Les transformateurs de qualité sont imprégnés à l'ozokérite ou aux résines phénoliques qui les protègent contre l'humidité. Suivant la catégorie de matériel on procède de la façon suivante :

— *Imprégnation par trempé* : Précédée et suivie d'un étuvage prolongé. Suffisant dans la plupart des cas, ce traitement est rapide et économique.

— *Imprégnation sous vide et pression* : Elle est effectuée à l'autoclave suivant un cycle de longue durée comportant étuvage, déshydratation sous vide, imprégnation à cœur sous pression, polymérisation. Ce traitement est utilisé pour le matériel professionnel et recommandé pour les climats chauds et humides.

— *Double imprégnation* : Combinaison des deux précédents, ce traitement confère au matériel dans l'air une protection maximale analogue à celle obtenue par l'emploi de boîtiers étanches.

Fig. 3-63 Fig. 3-64 Fig. 3-65

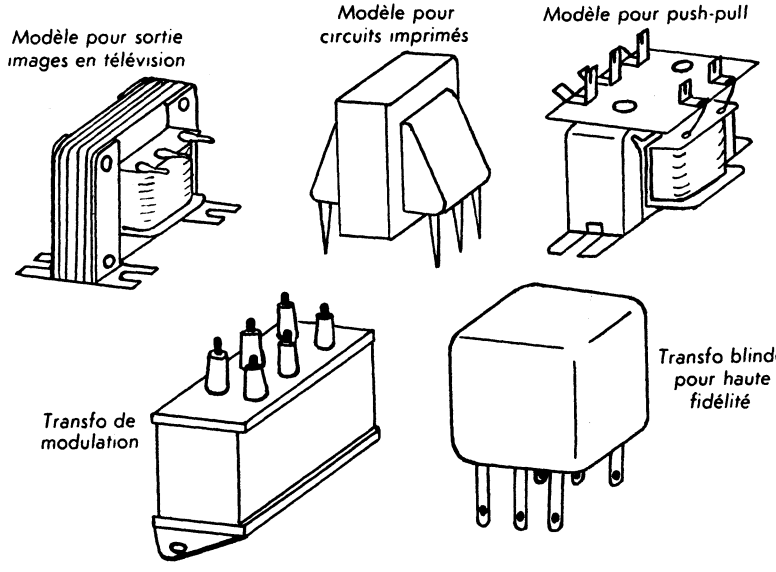


Fig. 3-66 Fig. 3-67

Modèles de transformateurs B.F.

b) Modèles moulés.

Ils sont enrobés dans un moulage de résines synthétiques (époxy, Araldite) qui leur permet de répondre aux conditions climatiques les plus dures (fig. 3-64). Les bornes de sorties présentent une grande robustesse mécanique et l'absence d'isolants liquides ou pâteux supprime la possibilité de fuites.

c) Modèles blindés.

Les transformateurs pour haute fidélité, pour modulation, sont placés dans un blindage en Mumétal qui les protège de l'action des champs magnétiques extérieurs (fig. 3-67).

d) Modèles en boîtier étanche.

Ils sont enfermés dans des boîtiers étanches en acier, remplis suivant l'usage d'huile, de pyralène, d'ozokérite (fig. 3-66).

Les sorties se font par bornes stéatite ou perles de verre.

Ces modèles sont utilisés en émission, dans le matériel militaire ou de laboratoire, pour les transformateurs d'impulsions de radar, etc.

IV. INDUCTANCES B.F.

On les utilise soit pour le filtrage du courant continu dans les alimentations sur secteur, soit comme inductances de choc pour bloquer un courant B.F. dans certains circuits (modulation par exemple).

A - Calcul d'une inductance de filtrage.

La valeur de l'inductance se calcule au moyen des formules donnant l'efficacité des filtres (voir cours théorique)

$$4\ H < L < 20\ \text{H} \qquad 100\ \Omega < R < 500\ \Omega$$

Le schéma d'un filtre à condensateur d'entrée est représenté à la figure 3-68.

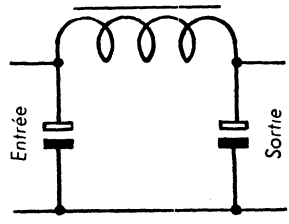


Fig. 3-68

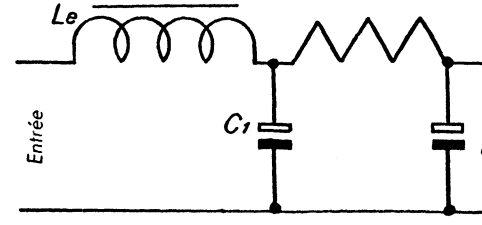


Fig. 3-69

Filtres à inductances B.F.

Bien que plus onéreux un filtre à inductance d'entrée peut être justifié pour une meilleure stabilité de la tension ou obligatoire avec une valve à gaz pour éviter une destruction de la cathode par des courants instantanés de décharge du condensateur trop élevés (fig. 3-69). Dans ce cas on doit s'assurer que :

$L_e\ C_1 \geqslant 20$ (pour secteur 50 Hz)

et $L_e \geqslant R_s/600$.

L_e en henrys, C_1 en microfarads et R_s en ohms. R_s représente la résistance équivalente au circuit d'utilisation.

La section du fer choisie, surtout basée sur l'expérience, peut être déterminée à l'aide du tableau suivant en fonction du produit LI^2 (inductance × carré du courant continu).

TABLEAU 3-2 — SECTIONS DE FER

LI^2	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1
S_{cm^2}	2	3	4	6	8	10	13

D'après la section du noyau obtenue on choisit un circuit cuirassé de dimensions standard.

Une section carrée du noyau donne les meilleurs résultats.

Le nombre de spires N est donné par la relation

$$N^2 = \frac{R_{cc}\, S_0\, K}{\rho\, l}$$

R_{cc} : résistance en courant continu de la bobine (Ω).

S_0 : section de la fenêtre (cm^2).

K : coefficient de remplissage de la fenêtre compris entre 0,35 et 0,5.

ρ : résistivité du fil (Ω cm).

l : longueur de la spire moyenne (cm).

L'égalité $N \cdot s = K \cdot S_0$ permet ensuite de déterminer la section du fil s.

B - Caractéristiques des inductances.

1° Inductances B.F. de filtrage.

— Résistance en courant continu de l'enroulement.

— Valeur de l'inductance définie par LI^2, I étant le courant continu maximum d'emploi déterminé par les conditions d'utilisation.

— Tension nominale de service.

2° Inductances B.F. de modulation.

— Résistance en courant continu de l'enroulement.

— Valeur de l'inductance à la fréquence minimale à transmettre et à la tension maximale aux bornes.

— Bande passante.

— Module de l'impédance pour la fréquence la plus basse.

— Capacité par rapport à la masse.

— Tension nominale de service.

— Equilibrage dans la bande de fréquence pour les inductances à point milieu.

C - Construction.

Le choix des matériaux, la forme des circuits, la protection sont tributaires des mêmes règles que celles appliquées dans la construction des transformateurs d'alimentation ou des transformateurs B.F.

Pour stabiliser l'inductance et réduire l'induction dans le fer on ménage un entrefer dans le circuit magnétique.

La qualité de l'inductance est définie par le coefficient de surtension $Q = L\omega/R$.

La résistance effective donnée par le circuit équivalent figure 3-70 est $R = R_s + L^2\omega^2/R_p$.

R_s : résistance ohmique.

R_p : résistance d'amortissement due aux pertes dans le fer.

La qualité de la bobine sera d'autant meilleure que l'ensemble des pertes sera plus faible.

La figure 3-71 montre un modèle courant d'inductance de filtrage.

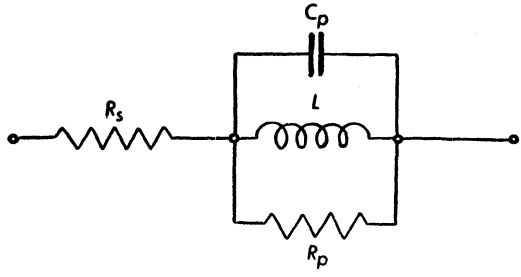


Fig. 3-70
Circuit équivalent d'une bobine d'inductance

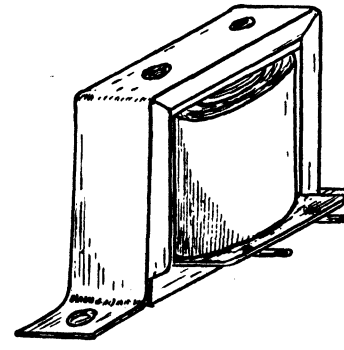


Fig. 3-71
Inductance de filtrage

V. ESSAIS.

A - Liste des essais.

L'ensemble des essais qui peuvent être effectués sur les transformateurs et inductances B.F. est donné ci-après :

1° Vérification dimensionnelle.

2° Essais mécaniques.

— Traction des sorties. Torsion des bornes.

— Etanchéité (pour les appareils à cuve étanche seulement). Vibrations. Secousses. Soudure.

3° Essais électriques.

— Rigidité diélectrique. Isolement. Effet couronne. Vérification des caractéristiques à vide et en charge (voir pour chaque type les caractéristiques à vérifier). Capacité entre enroulements. Tension de court-circuit. Pertes à vide. Rendement avec puissances en watts. Symétrie des impédances en régime de fonctionnement (pour redresseurs H.T.). Surexcitation. F.e.m. de commutation. Rayonnement.

4° Essais climatiques.

— Essais cycliques.
— Essais tropicaux.

5° Essais d'endurance.

— Surcharge de longue durée.
— Essai d'immersion.

B - Exécution des essais.

Les essais effectués sont variables suivant la catégorie de matériel considéré (amateur, professionnel, tropicalisé).

Par exemple seuls les matériels étanches subiront les essais d'étanchéité, de vibrations et cycliques. Les appareils tropicalisés seront soumis aux essais tropicaux et aux essais d'immersion.

D'autre part on divise l'ensemble des essais en

— *Essais de contrôle* : effectués sur chaque matériel. Ils comprennent la vérification des caractéristiques, l'essai diélectrique, la mesure de l'isolement et l'essai de surexcitation.

— *Essais de type* : ce sont des essais statistiques effectués sur un certain nombre d'appareils seulement (2 %).

VI. NORMES.

NF C 01-010 : Vocabulaire électrotechnique : Machines et transformateurs (1960).
UTE C 52-100 : Transformateurs électriques : Règles (1961).
UTE C 42-500 : Transformateurs de mesure : Règles (1958).
UTE C 42-501 : Transformateurs de tension : caractéristiques (1958).
UTE C 42-502 : Transformateurs de courant : caractéristiques (1958).
NF C 28-900 : Tôles pour circuits magnétiques : spécifications (1956).
UTE C 28-910 : Tôles magnétiques en rouleaux (1960).
UTE C 28-920 : Tôles à cristaux orientés (1960).
CCTU 06-01 : Noyaux magnétiques en C. Spécification dimensionnelle (1957).
CCTU 342 : Epreuves et essais des transformateurs et inductances de basse fréquence (1952).
CCTU 344 : Transformateurs d'alimentation blindés étanches (1953).
CCTU 345 : Bobines d'inductance pour filtrage (1953).
CCTU 06-03 : Accessoires pour noyaux magnétiques en C (1960).
CCTU 06-11 : Transformateurs d'alimentation : généralités et homologation (1961).

CHAPITRE 4

BOBINAGES H.F.

I. GÉNÉRALITÉS.

Les définitions et symboles donnés au chapitre « Bobinages B.F. » sont applicables aux bobinages H.F. ($f > 30$ kHz).

A - Formules générales.

— Inductance propre :

$$L = \mu \frac{n^2 S}{l}$$

L : inductance en henrys (H);
μ : perméabilité absolue en H/m;

$$(\mu = \mu_o \mu_r \text{ avec } \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m})$$

n : nombre de spires;
S : section effective du noyau en m^2;
l : longueur moyenne du circuit magnétique en mètre.

— Energie emmagasinée par une bobine :

$$W = L I^2$$

W en joules, I en ampères, L en henrys.

— Impédance d'une bobine (formule simplifiée) :

$$Z^2 = R^2 + L^2 \omega^2$$

Z : impédance en ohms;
R : résistance propre de la bobine en ohms;
$\omega \ 2 = \pi f$: pulsation en rd/s, f étant la fréquence considérée en hertz.

— Coefficient de surtension

$$Q = \frac{L\omega}{R} = \frac{1}{\text{tg } \delta}$$

tg δ : facteur de pertes

R : résistance série équivalente.

La résistance série augmente avec les pertes et diminue le coefficient de surtension, donc la qualité du bobinage.

— Inductances en série (exemptes d'induction mutuelle)

$$L = L_1 + L_2 + \ldots + L_n$$

— Inductances en parallèle (exemptes d'induction mutuelle)

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \ldots + \frac{1}{L_n}$$

— Circuit oscillant :

La fréquence de résonance est donnée par la formule

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C}}$$

— Sélectivité d'un circuit résonnant

$$S = \sqrt{1 + 4\,Q^2\left(\frac{\Delta f}{f_o}\right)^2}.$$

La sélectivité est d'autant plus grande que le coefficient de surtension est plus élevé.

Δf représente le désaccord par rapport à la fréquence de résonance f_o.

B - Pertes dans les bobinages [1].

1° Pertes dans les conducteurs.

Elles comprennent les pertes par effet Joule augmentées en H.F. des pertes par courants de Foucault proportionnelles au carré de la fréquence et des pertes par effet pelliculaire qui augmentent avec la fréquence.

2° Pertes dans les isolants.

Ce sont les pertes diélectriques dans les isolants du fil et dans la carcasse. Elles augmentent avec f et avec le volume du diélectrique.

[1] Revoir à ce sujet le chapitre 2 du tome I.

3° Pertes dans les noyaux magnétiques.

La qualité d'un matériau magnétique est caractérisée par sa perméabilité et par ses pertes.

— pertes par courants de Foucault proportionnelles au carré de la fréquence;

— pertes par hystérésis proportionnelles à la fréquence;

— pertes par traînage proportionnelles à la fréquence.

Lorsque le bobinage rayonne à l'extérieur, il existe des pertes par courants de Foucault dans les pièces métalliques voisines telles que les blindages.

4° Capacité répartie.

Elle est due aux faibles capacités qui existent entre les spires et par rapport aux conducteurs voisins. La capacité équivalente appelée capacité répartie est négligeable aux basses fréquences mais son influence aux hautes fréquences supérieures à 3 MHz se fait sentir par l'augmentation de l'inductance par effet de résonance avec cette capacité. La résistance apparente augmente.

II. MATÉRIAUX.

A - Conducteurs.

Comme pour les bobinages B.F., c'est le cuivre électrolytique qui est adopté.

Nous avons vu que les courants H.F. circulent en surface des conducteurs (effet pelliculaire) d'où l'emploi de fils argentés pour des fréquences supérieures à 3 MHz sur appareils professionnels. La diminution de l'effet pelliculaire est obtenue d'autre part par l'utilisation de fil divisé constitué par un grand nombre de fils fins. Chaque brin doit être soigneusement isolé de ses voisins. Ils sont torsadés de façon à occuper toutes les positions possibles à l'intérieur du conducteur pour être uniformément influencés par le champ magnétique. Pour la soudure en extrémité on veille à ce que tous les brins soient soudés entre eux.

En émission les tubes ou rubans remplacent le fil divisé.

Au-dessus de 1 MHz, le calcul et l'expérience montrent que l'utilisation du fil divisé doit être prohibée. Au-delà de cette fréquence, les pertes dans l'isolant augmentent plus vite que les pertes par effet pelliculaire.

Le fil divisé est fabriqué en diverses qualités (6 brins de 0,1 mm — 10 brins de 0,06 mm — 20 brins de 0,06 mm — 30 brins de 0,05 mm). L'ensemble est recouvert de une ou deux couches de soie.

B - Isolants.

1° Isolants de fils.

Les fils sont pratiquement toujours émaillés. Les vernis émail à base de résines synthétiques doivent posséder de grandes qualités électriques, thermiques et mécaniques.

D'excellents isolants en H.F. peuvent être utilisés : les résines époxy, les silicones et surtout depuis 1954 le polytétrafluoréthylène et les esters de l'acide téréphtalique (polyesters).

Les fils émaillés thermo-adhérents possèdent un vernis superficiel de collage.

Pour compléter l'isolement, en particulier pour les bobinages en nid d'abeilles, on recouvre le fil d'un guipage de soie peu encombrante et ayant de faibles pertes en H.F.

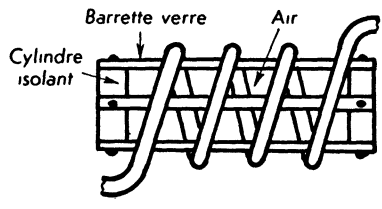


Fig. 4-1

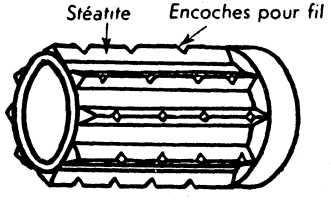


Fig. 4-2

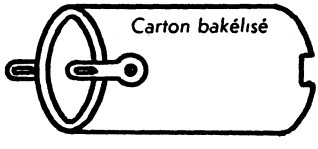


Fig. 4-3

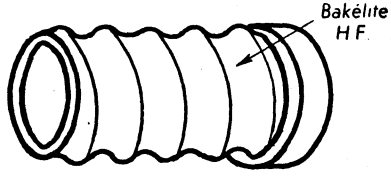


Fig. 4-4

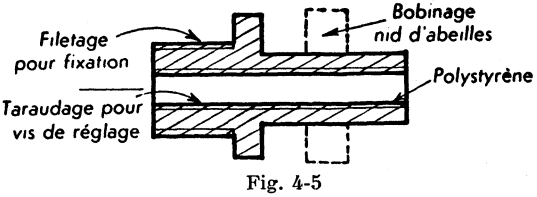


Fig. 4-5

2° Support.

a) Air.

C'est le meilleur des isolants. Mais un bobinage ne peut être employé sans support que si le fil a un diamètre suffisant assurant la rigidité. Cette condition est remplie pour les ondes décamétriques ou métriques sur matériel professionnel ou d'émission. Cette disposition est facilitée par le faible diamètre des spires et leur nombre réduit.

La rigidité peut être augmentée par des barrettes en verre ou stéatite formant les arêtes d'un polygone sur lesquelles sont fixées les spires (fig. 4-1).

b) Isolants minéraux.

Les isolants tels que le quartz, la stéatite et les céramiques diverses sont utilisés pour les ondes métriques ou décamétriques sur matériel professionnel ou d'émission. Ils sont indispensables pour équiper le matériel tropicalisé. Le fil nu est placé dans des encoches. Les spires sont espacées et le support est à rainures de façon à aérer le bobinage (fig. 4-2).

c) Isolants synthétiques.

Ils sont universellement adoptés sur le matériel amateur.

Les plus employés sont le polystyrène et la bakélite H.F. (fig. 4-5). Le carton bakélisé sensible à l'humidité est de moins en moins utilisé (fig. 4-3). En O.C. les supports sont à rainures ou possèdent une gorge hélicoïdale dans laquelle vient se placer le fil (fig. 4-4).

Ces supports peuvent être filetés intérieurement pour recevoir un noyau magnétique réglable.

3° Protection.

a) Imprégnation.

Elle se fait par trempage dans de l'ozokérite B à 80 ou 85 °C pendant 5 à 10 minutes. Après séchage on retrempe dans un deuxième bain d'ozokérite A à 90°. Après avoir retiré les bobinages la cire se fige. La protection contre l'air humide est assurée.

Un deuxième procédé consiste à sécher le bobinage par chauffage puis à l'imprégner sous vide avec une résine synthétique H.F. On termine par un séchage au four.

b) Tropicalisation.

Elle doit permettre aux bobinages de résister à la température, à une grande humidité, aux moisissures, aux micro-organismes, à l'air salin et aux poussières. Dans ce cas les supports et traversées de fils sont en céramique, les bobinages sont à fil émaillé espacés ou en nid d'abeilles guipés soie. L'imprégnation se fait avec des cires H.F. ou des résines synthétiques. Dans certains cas les bobines sont montées sous tubes de verre ou de plastique vides d'air. Les sorties de fil se font sur plaquettes céramique et les soudures sont laquées. Les blindages sont recouverts d'un vernis fongicide.

C - Matériaux magnétiques.

Pour augmenter le coefficient de surtension on peut obtenir une valeur de l'inductance plus élevée en améliorant la perméabilité (tous autres facteurs restant identiques).

L'utilisation de fer est donc tout indiquée mais sous une forme particulière (fer divisé) destinée à diminuer les pertes par courants de Foucault qui deviennent très importantes en H.F. puisqu'elles sont proportionnelles

au carré de la fréquence. C'est pourquoi d'ailleurs, même avec le fer divisé, il y a une limite de fréquence au-delà de laquelle les pertes deviennent importantes.

La mise au point des ferrites doux est venue reculer cette limite puisque certains peuvent être employés jusqu'à 100 MHz.

1° Poudre de fer.

a) Fabrication.

Les poudres sont obtenues en chauffant du minerai de fer en atmosphère d'oxyde de carbone. La réaction donne du fer pentacarbonyle Fe $(CO)_5$ liquide. La réaction est réversible et le chauffage libère l'oxyde de carbone en laissant déposer de fines particules de fer sphériques. Les particules sont ensuite triées suivant des diamètres variant de 3 à 20 μ.

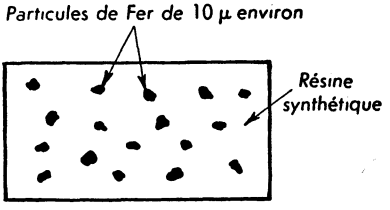


Fig. 4-6. — Fer divisé

Les grains les plus fins seront réservés à la fabrication des noyaux supportant les plus hautes fréquences.

Le fer pulvérulent est ensuite mélangé à une pâte à base de résine formophénolique. La pâte est séchée, broyée et la nouvelle poudre obtenue est mélangée à un lubrifiant (2 % de stéarate de zinc) qui va faciliter le moulage selon les formes classiques sous des pressions de 200 à 1 600 mégapascals. Enfin les noyaux sont polymérisés à chaud.

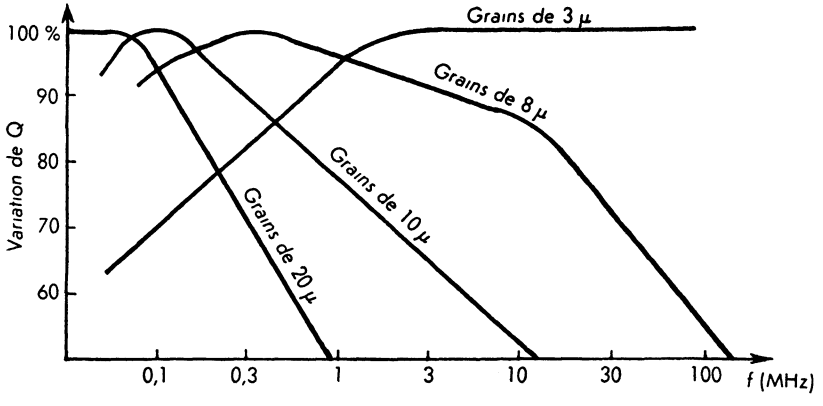


Fig. 4-7. — Variation de Q en fonction de f pour divers noyaux en fer pulvérulent

La figure 4-6 donne une idée de la densité des grains.

Le graphique de la figure 4-7 donne pour quatre qualités de poudres les variations du coefficient de surtension en fonction de la fréquence.

b) Applications.

Les poudres de 20 μ et au-dessous sont utilisées en B.F. jusqu'à 100 kHz; celles de 10 μ jusqu'à 300 kHz sous forme de noyaux de formes diverses pour bobinages M.F.; celles de 8 μ sont utilisables en H.F. sous forme de vis de réglage des noyaux. Les poudres de 3 μ sont employées sur récepteurs de trafic en ondes métriques ou sur récepteurs de télévision et de modulation de fréquence.

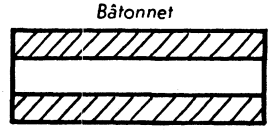


Fig. 4-8

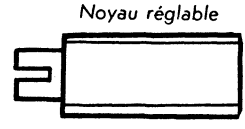


Fig. 4-9

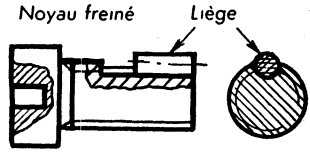


Fig. 4-10

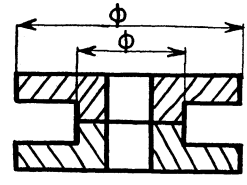


Fig. 4-11

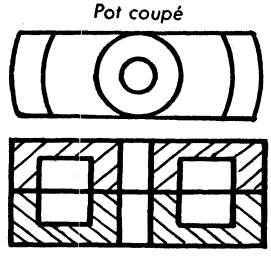


Fig. 4-12

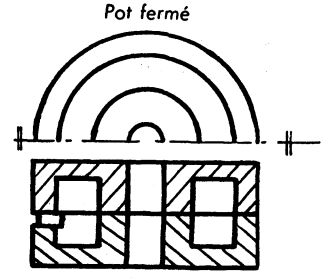


Fig. 4-13

Les circuits magnétiques en fer divisé sont plus sensibles à l'humidité que ceux en ferrite et leur protection doit être plus poussée. Par contre ils permettent d'obtenir des ensembles plus stables en fonction de la température.

Pour augmenter la perméabilité tout en réduisant les pertes par hystérésis on utilise des poudres de ferronickel (Mumétal).

c) Différentes formes.

— *Bâtonnets* (fig. 4-8) : Ils sont économiques et peu fragiles mais les lignes de force se referment dans l'air et ils nécessitent un poids de fil plus grand que les modèles suivants.

Leur coefficient de surtension va de 220 à 280 en M.F. Deux bobines placées sur un même bâtonnet peuvent avoir un coefficient de couplage de 0,6 à 0,7.

Les fréquences d'emploi s'étendent de 100 kHz à 3 MHz.

— *Vis* : Il existe différents modèles dont l'un d'eux est donné à la figure 4-9. Ils permettent une variation du coefficient d'induction de 10 à 15 %. Ils sont montés soit sur noyaux magnétiques ou isolants ou même directement sur les spires du fil (télévision). Pour empêcher le déréglage par suite de vibrations on les immobilise avec de la cire H.F. ou avec un frein en liège (fig. 4-10).

— *Poulies et pots coupés* (fig. 4-11 et 4-12) : Ces modèles donnent les résultats intermédiaires entre les bâtonnets et les pots fermés.

Coefficient de surtension : 300 à 320 en M.F.

Deux bobines montées dans le même pot donnent un coefficient de couplage de 0,8.

La perméabilité effective est voisine de 3,5.

— *Pots fermés* (fig. 4-13) : les fuites magnétiques sont très faibles car le circuit est complètement fermé. Le blindage peut être réduit.

Coefficient de surtension : 380 à 450 en M.F.

Deux bobines montées dans le même pot permettent d'atteindre un coefficient de couplage de 0,9 à 0,99.

La perméabilité effective atteint 4 à 6.

— *Noyaux en X* : utilisés sur circuits imprimés ils permettent une réduction de l'encombrement.

2° Ferrites doux.

a) Propriétés.

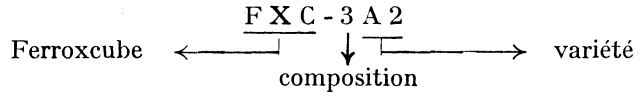
Les ferrites ont permis l'obtention de noyaux ayant de très fortes perméabilités tout en ayant des pertes par courants de Foucault négligeables puisque ce sont des semi-conducteurs ayant une résistivité importante allant de 100 Ω cm à 100 MΩ cm. La perméabilité qui est de 10 environ pour le fer divisé va de 50 à 5 000 suivant les fréquences pour les ferrites. Par contre ils sont fragiles.

L'homogénéité structurale donne par ailleurs de faibles pertes par hystérésis.

Les ferrites doux (Ferroxcube) sont constitués par un mélange de cristaux cubiques à structure particulière dite spinelle (1) de formule générale M $Fe_2 O_4$ où M représente un métal bivalent (Cu, Mg, Mn, Ni, Fe ou Zn).

Les deux types principaux sont les ferrites mixtes manganèse-zinc qui représentent des propriétés remarquables jusqu'à quelques MHz et les ferrites nickel-zinc qui sont surtout utilisés aux fréquences élevées jusqu'à 200 MHz.— (Des ferrites hyperfréquences permettent d'atteindre 10 000 MHz).

Les Ferroxcubes « Philips » sont désignés de la façon suivante :



(1) Le spinelle a pour formule Mg $Al_2 O_4$.

Le chiffre de composition 3 désigne les ferrites « manganèse-zinc », le chiffre 4 ceux à base de « nickel-zinc », etc. Pour chaque composition il existe plusieurs variétés ayant des plages de fréquences d'utilisation différentes. Le tableau suivant donne les propriétés de quelques ferrites (1).

b) Fabrication.

Les poudres d'oxydes, en proportions convenables, sont intimement mélangées puis matricées à la forme désirée sous forte pression. Les noyaux subissent ensuite un frittage à une température de l'ordre de 1 200 à 1 300 °C pendant 2 à 4 h. La température et le temps sont choisis d'après la nature des mélanges utilisés et des propriétés recherchées.

c) Applications.

La gamme très étendue des propriétés due à la grande diversité de composition donne un champ d'application très vaste dans tous les domaines de l'électronique et à toutes les fréquences jusqu'à 200 MHz.

D'après leurs propriétés on peut les classer en ferrites pour bobines à facteur de qualité élevé (Q = 300 à 1 000), ferrites à haute perméabilité, ferrites à haute saturation, ferrites à cycle rectangulaire, ferrites pour très hautes fréquences.

Le facteur de qualité et la stabilité des noyaux en pots sont améliorés par la réalisation d'un entrefer obtenu par rectification et nettement défini puisque le rayonnement de l'entrefer ne peut s'étendre à l'extérieur (fig. 4-14). A encombrement égal, ils surclassent nettement les noyaux en poudre de fer carbonyle jusqu'à 500 kHz.

Pour les fréquences plus élevées (1 à 100 MHz) le circuit en pot est remplacé par des bâtonnets pleins ou creux (fig. 4-18 et 4-19) généralement réalisés en ferrite de nickel-zinc bien adapté à ces fréquences. Ils sont utilisés pour les bobines d'arrêt, inductances réglables et antennes cadre.

Les circuits magnétiques pour transformateurs à large bande ont différentes formes dont les plus courantes sont le double L (fig. 4-16), l'U et I (fig. 4-17), quelquefois le E et I, le tore (fig. 4-15). Sauf pour les fréquences très basses les ferrites ont des performances meilleures que les circuits en tôles découpées. Le nombre de spires peut être moins élevé d'où faible inductance de fuite et faible capacité répartie, favorables à la transmission d'une large bande de fréquences ainsi que des pertes négligeables.

Pour les transformateurs de puissance l'avantage reste aux tôles découpées qui ont des inductions dépassant 1 Wb/m^2. Néanmoins dans le cas où les pertes doivent être très faibles (transmission d'harmoniques avec fidélité, temps de retour rapide) ils sont largement utilisés.

C'est le cas des circuits magnétiques pour transformateurs de lignes avec noyaux en U à jambes rondes ou carrées (fig. 4-20) et de ceux pour bobines

(1) Les principales appellations commerciales des ferrites doux sont :
Ferrites Mn-Zn (Ferroxcube 3, Fermalite, Ferrite type T)
Ferrites Ni-Zn (Ferroxcube 4, Fernilite, Ferrite type H).

TABLEAU 4-1. — FERRITES DOUX

		Plage de fréquences	Perméabilité initiale	B de saturation à 20 °C (W_b/m²)	Résistivité (Ωcm)	Point de Curie (°C)	Applications
FERROXCUBE 3	3 A	1 kHz à 500 kHz	1 400	0,365	50	155	Transformateurs B.F. et M.F. à large bande.
	3 B		900	0,34	100	100	Filtres et inductances de circuits sélectifs (pots).
	3 C		1 100	0,4	50	180	Transfo. de lignes T.V. Bobines de déflexion T.V. Têtes d'enregistrement magnétique.
FERROXCUBE 4	4 A	0 à 0,5 MHz	600	0,29	10^5	125	Bobines d'arrêt à faible *B*.
	4 B	0 à 2 MHz	250	0,32		250	Antennes cadre.
	4 C	2 à 5 MHz	125	0,27		380	Noyaux et bâtonnets pour filtres et inductances réglables.
	4 D	5 à 20 MHz	50	0,25		360	
	4 E	20 à 50 MHz	15	0,19		550	
	4 F	50 à 100 MHz	7	0,15		—	
FXC-6	6 C 6 F	Temps de basculement 1 µs « « 0,45 µs		0,14			Variété à cycle rectangulaire pour mémoires magnétiques.

de déflexion employés pour le balayage lignes des téléviseurs avec bagues crénelées (fig. 4-21), bagues cylindriques en deux parties (fig. 4-22 et 4-23).

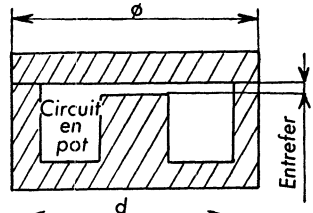


Fig. 4-14

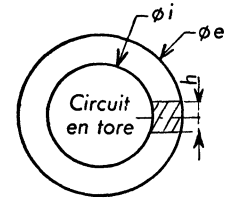


Fig. 4-15

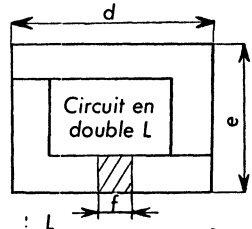


Fig. 4-16

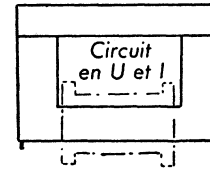


Fig. 4-17

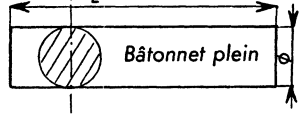


Fig. 4-18

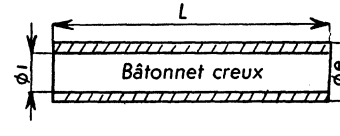


Fig. 4-19

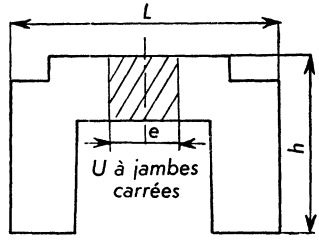


Fig. 4-20

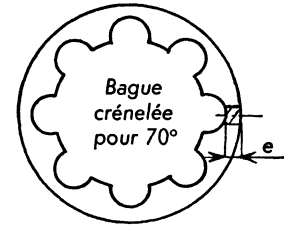


Fig. 4-21

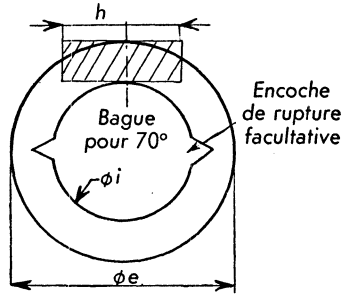


Fig. 4-22

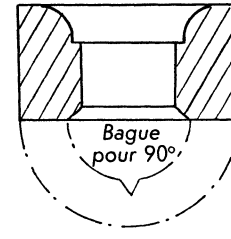


Fig. 4-23

Noyaux en ferrites doux
Les cotes correspondent aux dimensions caractéristiques

Les ferrites à propriétés particulières (saturation rapide, cycle d'hystérésis rectangulaire) sont employés dans les amplificateurs magnétiques, servomécanismes et mémoires magnétiques sur machines à calculer.

En hyperfréquences, ils présentent un grand intérêt car ils se laissent traverser sans affaiblissement notable par les ondes électromagnétiques et ils servent à réaliser des séparateurs à transmission dissymétrique (découplage de klystrons).

Citons encore pour terminer leurs applications extrêmement nombreuses et variées, la réalisation de ferrites à coefficient de température positif (compensation de la dérive de capacité des condensateurs au polystyrène) et certaines variétés à coefficient de température négligeable entre (— 40 °C et + 100 °C).

d) Essais : NF C 93 320.

Ils comportent un examen visuel :

— vérification des dimensions qui doivent être comprises dans les tolérances indiquées sur les spécifications particulières.

— Aspect : Les pièces ne doivent présenter aucun défaut visible à l'œil nu tel que : faille, éclat, etc.

— Vérification de la marque distinctive éventuelle.

Essais électriques :

— mesure du coefficient de surtension à l'aide d'un Q mètre.

— mesure de la perméabilité.

D - Blindage magnétique.

1° Principe.

Le blindage a pour but d'arrêter le rayonnement magnétique dû au bobinage. Les courants de Foucault induits dans le métal du blindage produisent un champ magnétique qui annule celui produit par le bobinage qui y est enfermé.

La mise sous blindage entraîne une diminution du coefficient d'auto-induction et on la compense dans le calcul du bobinage par une augmentation du nombre de spires.

2° Nature.

Le blindage est constitué par de l'aluminium en matériel amateur, ou de l'aluminium plaqué cuivre en matériel professionnel. L'efficacité du blindage est d'autant plus grande que la fréquence est plus élevée.

3° Dimensions, formes.

Les blindages sont à sections circulaires, carrées, rectangulaires suivant la grosseur et la forme des bobinages à blinder. Ils sont obtenus par filage ou extrusion.

Théoriquement le diamètre doit être égal à 3 fois le diamètre du bobinage et l'épaisseur doit avoir au moins 1 mm. Actuellement les noyaux fermés en fer divisé ou en ferrites ont permis de réduire les dimensions et les épaisseurs.

III. MODES DE BOBINAGES.

A - Différents types.

1° Bobinages cylindriques.

Les bobinages en ondes métriques et décamétriques sont réalisés dans l'air ou sur carcasse à rainures. Lorsque le fil ou le tube utilisés sont suffisamment gros (émission), la rigidité propre suffit au maintien de la bobine.

Dans le cas contraire, on bobine sur barrettes (fig. 4-1), avec ligatures (fig. 4-24) ou sur mandrin à rainures (fig. 4-2 et fig. 4-25). Pour diminuer la capacité répartie, le diamètre ne doit pas être trop grand et les spires doivent être suffisamment espacées et aérées (espace supérieur ou égal au diamètre du fil). En ondes hectométriques les spires de fil isolé peuvent être jointives (fig. 4-26).

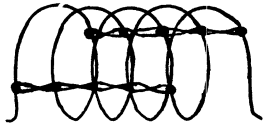


Fig. 4-24

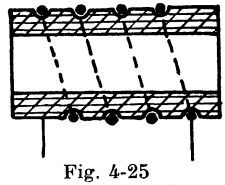


Fig. 4-25

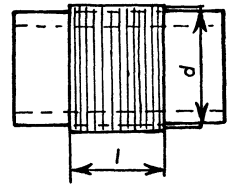


Fig. 4-26

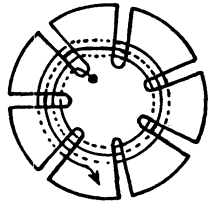


Fig. 4-27

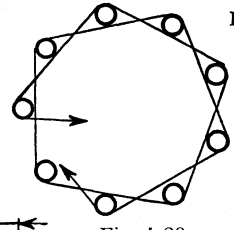


Fig. 4-28

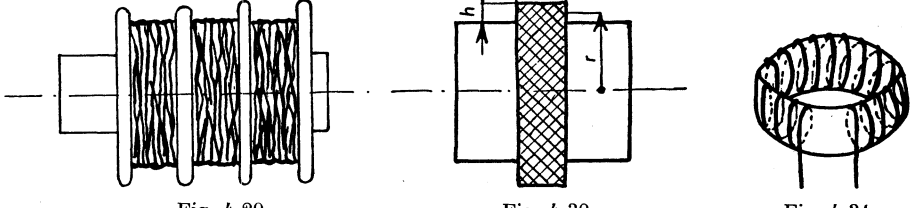


Fig. 4-29

Fig. 4-30

Fig. 4-31

2° Bobinages de formes particulières.

Le bobinage en fond de panier (fig. 4-27) réalisé sur carton à encoches et le bobinage en gabion ou flanc de panier (fig. 4-28) ne se prêtent pas à des réalisations industrielles et ils ne sont utilisés que dans des cas particuliers de réalisation amateur en O.C.

3° Bobinages en vrac.

Ils sont bobinés sur carcasse sans se préoccuper du rangement des spires. Pour diminuer leur capacité répartie qui est très importante, ils sont fractionnés dans une carcasse à gorges (fig. 4-29).

Ils peuvent être utilisés sur ondes hectométriques.

4° Bobinages en nid d'abeilles.

Ils sont réalisés industriellement sur machine à bobiner. Employés sur ondes hectométriques et kilométriques, leur capacité répartie est très faible. Leur rigidité est assurée par un vernis d'imprégnation (fig. 4-30). Ils ont un faible encombrement pour de fortes valeurs d'inductance.

5° Bobinages toroïdaux.

Ils sont réservés à des usages professionnels, car ils sont délicats à construire (fig. 4-31). Leurs pertes sont minimales et ils ne réagissent pas sur les bobinages voisins.

B - Machines à bobiner.

1° Touret à main. — Bobinages cylindriques.

Le support de bobine est placé entre les pointes de la broche commandée par un moteur électrique. Le fil est guidé à la main et l'ouvrier actionne le débrayage lorsque le nombre indiqué par un compte-tours est correct. L'arrêt automatique peut être commandé par le compte-tours. Le fil est ensuite coupé et fixé en extrémité.

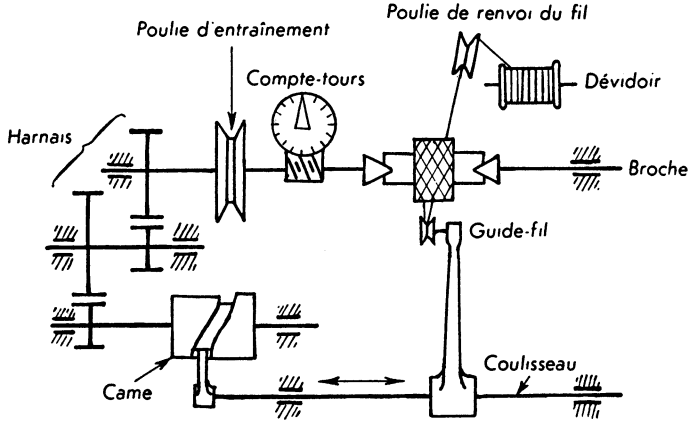


Fig. 4-32. — Machine à bobiner en nid d'abeilles

2° Bobineuse pour nids d'abeilles (fig. 4-32).

Le fil décrit un mouvement latéral d'aller et retour donné par une came, pendant la rotation de la broche. Le bobinage est dit « à simple vague »

s'il y a un aller-retour par tour, « à double vague » s'il y a deux aller-retour par tour, « à demi-vague » pour un aller-retour par 2 tours.

Les bobinages à simple vague sont utilisés pour les bobines à petit nombre de spires (maximum 200) de 450 à 1 500 kHz; ceux à demi-vague pour les bobines à grand nombre de spires (plus de 1 000 μH) utilisés pour bobines d'arrêt H.F.

Il existe des machines pouvant bobiner six bobines à la fois. L'arrêt est automatique lorsque le nombre de tours est atteint.

On appelle « pas de l'enroulement » le décalage nécessaire pour qu'à chaque tour le fil de la spire suivante ne se superpose pas à la spire précédente. On dit que le pas est de 1/25, si la broche fait 25 tours pendant que le guide-fil fait 24 aller-retour.

C - Calcul des bobinages.

1° Bobinage cylindrique (sur noyau isolant).

La valeur de l'induction propre est donnée par la formule de Nagaoka.

$$L = K\, n^2\, d\, 10^{-3}$$

L : en μH.

n : nombre de spires.

d : diamètre moyen en cm.

K : coefficient fonction du rapport d/l, l étant la longueur du bobinage. (fig. 4-26).

$$K = \frac{100\, d}{4\, d + 11\, l} \text{ (valeur approchée).}$$

En prenant $d/l = 2$ on obtient $K \approx 10$.

Si d/l est compris entre 0 et 3 on peut utiliser la formule pratique suivante avec une erreur inférieure à 3 % :

$$L = \frac{n^2\, d^2}{45\, d + 101\, l}$$

L en μH — d et l en cm.

2° Bobinage en nid d'abeilles.

La valeur de l'induction propre est donnée par :

$$L = \frac{n^2\, r^2}{18{,}5\, r + 31\, h + 35\, c}$$

L en μH.

n : nombre de spires.

r : rayon moyen en cm (fig. 4-30).

h et e : hauteur et épaisseur en cm.

Lorsque la bobine est à section carrée ($h = e$) et que $r = 1{,}5\ e$, on peut utiliser la formule simplifiée suivante :

$$L = \frac{n^2 r}{50}.$$

3° Influence des noyaux magnétiques.

L'utilisation de noyaux magnétiques permet d'obtenir des coefficients de surtension de 100 à 500 avec les poudres de fer et de 300 à 1 000 avec les ferrites.

La valeur de l'induction propre dépend de la forme, des dimensions, de l'existence d'un entrefer et de la nature du noyau. Pour chaque modèle de noyau on peut définir une perméabilité effective μ_e permettant d'utiliser les formules ci-dessus, la nouvelle valeur de l'inductance étant :

$$L' = \mu_e L$$

L' : inductance avec noyau magnétique.
L : inductance sans noyau magnétique.

Pour des noyaux en fer pulvérulent on a :

$\mu_e = 2$ à $2{,}5$: noyaux en bâtonnets
$\mu_e = 3{,}5$: poulies et pots coupés
$\mu_e = 4$ à 5 : noyaux en pots

L'utilisation de vis de réglage en matériau magnétique permet de faire varier l'inductance de 10 à 15 %.

4° Inductance mutuelle.

L'induction mutuelle M ou coefficient d'induction mutuelle est le quotient du flux d'induction magnétique que le courant d'un circuit détermine dans un autre circuit, par l'intensité du courant dans le premier circuit.

L'inductance totale L obtenue au moyen de deux bobines cylindriques couplées en série est :

$$L = L_1 + L_2 + 2\,M$$

L_1 et L_2 étant les inductances propres de chaque bobine prise isolément.

En calculant, L, L_1, L_2 au moyen des formules données précédemment on en déduit M (L est calculé avec les deux bobines mises bout à bout et bobinées dans le même sens).

Dans les autres cas (tels que bobines coaxiales), les calculs sont complexes et l'on a intérêt à mesurer la valeur des inductances des deux bobines montées en série ($L = L_1 + L_2 + 2\,M$) ou en opposition ($L' = L_1 + L_2 - 2\,M$) et on en déduit :

$$M = \frac{L - L'}{4}.$$

5° Sélectivité.

La sélectivité d'un circuit résonnant est donnée par la formule :

$$S = \sqrt{1 + 4\,Q^2\,(df/f_o)^2}.$$

Le deuxième facteur étant généralement très grand devant un on peut écrire :

$$S \approx 2\,Q\,df/f_o$$

f_o : fréquence de résonance.

df/f_o : pourcentage de désaccord.

Q : coefficient de surtension $= \dfrac{L\omega}{R}$.

Nous voyons que la sélectivité sera d'autant plus grande que Q sera grand c'est-à-dire L grand et R petit.

Pour augmenter la sélectivité on a donc intérêt à construire des bobinages de haute qualité.

La figure 4-33 montre les courbes de résonance obtenues avec des circuits de qualités différentes.

IV. APPLICATIONS.

A - Bobinages de réception H.F.

Les bobinages H.F. utilisés dans les récepteurs superhétérodynes en modulation d'amplitude comprennent : les bobinages d'entrée placés entre

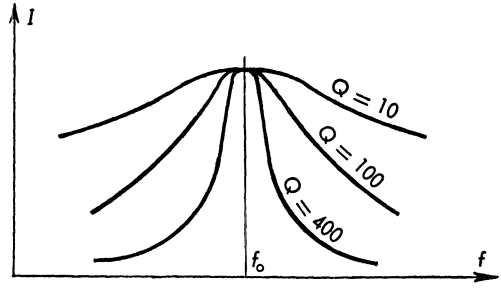


Fig. 4-33. — Courbes de résonance d'un circuit R.C.

l'antenne et le changement de fréquence, les bobinages oscillateurs destinés à engendrer l'oscillation locale.

1° Caractéristiques.

a) Caractéristiques d'ensemble (1).

— Caractéristiques du condensateur variable à utiliser.

— Gamme des fréquences couvertes.

— La valeur de la fréquence intermédiaire à utiliser. Elle a été normalisée :

$$F.I. = 455 \text{ kHz}$$

— La description de l'antenne pour laquelle l'ensemble des bobinages est prévu.

— L'affaiblissement dû au désaccord introduit par l'antenne type, cet affaiblissement doit être indiqué pour le point d'alignement où le désaccord est maximum.

— Les points d'alignement pour chaque gamme de fréquence.

b) Caractéristiques des bobinages d'entrée.

— La fréquence de résonance du primaire reliée à l'antenne fictive type (± 5 %).

— La courbe, donnant en fonction de la fréquence, le rapport de la tension aux bornes du secondaire à la tension d'entrée du générateur H.F. prise avant l'antenne fictive (± 20 %).

— La bande passante mesurée pour un affaiblissement de 20 dB correspondant au réglage sur les deux points d'alignement extrêmes (± 10 %).

— L'affaiblissement de la *F.I.* (2).

— L'affaiblissement de la fréquence image aux points d'alignement (3) normaux.

c) Caractéristiques des bobinages oscillateurs.

Ce sont les mêmes que celles des bobinages d'entrée.

Elles doivent être définies pour un type de lampe et des conditions de fonctionnement données.

2° Essais.

Ils comprennent des essais de type effectués sur un nombre restreint d'échantillons prêts à la livraison et des essais de contrôle qui sont effectués sur chaque bobinage et comprennent :

— la vérification des caractéristiques,

— le contrôle de l'affaiblissement dû à la variation du désaccord entre le circuit d'entrée et le circuit oscillateur.

(1) Ces caractéristiques doivent être communiquées au client par le constructeur.

(2) Affaiblissement de la F.I. : Il est défini par le rapport entre la tension d'un brouilleur sur la F.I. et la tension du signal sur laquelle le bobinage a été accordé, ces deux tensions donnant le même niveau de sortie et la mesure étant faite dans le cas le plus défavorable.

(3) Points d'alignement. Points pour lesquels la différence entre la fréquence d'accord et celle de l'oscillateur local est exactement égale à la F.I.

L'ensemble des essais comporte :

— Vérification d'ensemble (marquage, longueur des fils de connexion, etc.).
— Vérification des caractéristiques énumérées au paragraphe précédent.
— Mesure du rapport des tensions entre le secondaire et le primaire.
— Mesure de l'affaiblissement.
— Essai de variation de température.
— Essai hygroscopique.
— Essai de vibrations et de chocs.

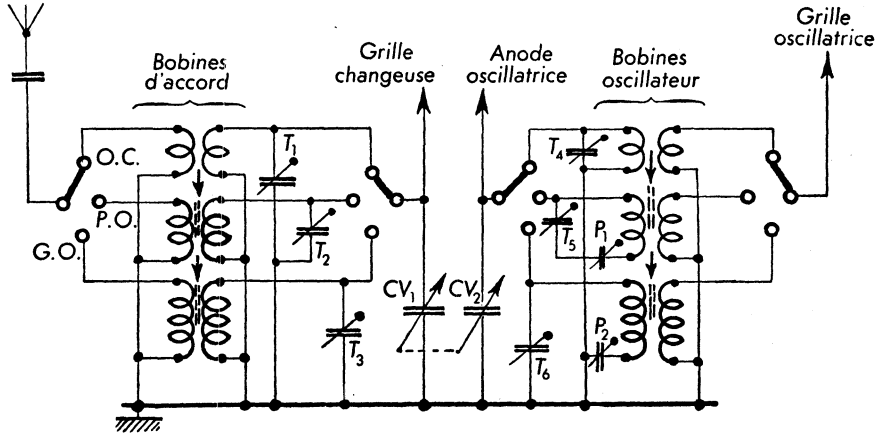


Fig. 4-34. — Schéma des circuits d'un bloc d'accord type

3° Description d'un bloc d'accord-type.

Le schéma de la figure 4-34 indique l'ensemble des éléments qui constituent un bloc d'accord type pour superhétérodyne utilisé avec un C.V. à 2 cages de 490 pF. Il est prévu pour recevoir trois gammes d'ondes (1).

— Grandes ondes G.O. 150 à 300 kHz (1 000 à 2 000 m).
— Petites ondes P.O. 520 à 1 600 kHz (187 à 577 m).
— Ondes courtes O.C. 5 à 18 MHz (16 à 50 m).

Ce bloc d'accord comprend :

a) Les bobinages d'entrée.

Ondes courtes O.C.

Secondaire en fil émaillé de 0,2 à 0,4 mm de diamètre.

Primaire en fil de 0,1 à 0,14 mm de diamètre isolé deux couches soie.

(1) Les bandes de fréquences comprises entre ces 3 gammes sont réservées à la radionavigation, à la marine, à l'aviation, à la météorologie et au trafic amateur.

Ce sont des bobinages cylindriques sur noyau polystyrène à gorge, le primaire étant bobiné par dessus le secondaire ou entre les spires du secondaire si elles sont suffisamment écartées. Le noyau peut comporter (ou non) une vis de réglage.

Petites ondes P.O.

Secondaire : fil divisé à 20 ou 30 brins de 0,05 mm, bobiné en nid d'abeilles sur noyau polystyrène ou Bakélite avec vis de réglage.

Primaire : fil plein de 0,1 à 0,14 mm bobiné par dessus le secondaire.

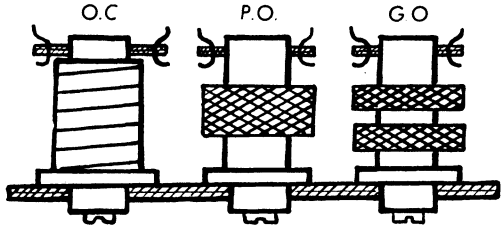


Fig. 4-35. — Bobinages d'accord

Grandes ondes G.O.

Primaire et secondaire sont en fil plein de 0,1 à 0,14 mm isolé par deux couches soie et bobinés en nid d'abeilles superposés sur noyau Bakélite à vis. Les bobinages peuvent être fractionnés pour diminuer la capacité répartie.

La figure 4-35 montre la disposition adoptée. Les noyaux sont montés sur une plaquette en carton bakélisé et chacun d'eux possède une rondelle en carton bakélisé sur laquelle sont serties les 4 cosses de sorties.

b) Les bobinages oscillateurs.

Les bobinages secondaires sont bobinés en sens inverse des bobinages primaires.

Ondes courtes O.C.

Primaire : fil émaillé de 0,4 mm.

Secondaire : fil de 0,12 à 0,14 mm isolé deux couches soie et bobiné par dessus le primaire ou entre les spires, si elles sont suffisamment écartées, sur noyau polystyrène avec ou sans vis de réglage.

Petites ondes P.O.

Primaire et secondaire en fil de 0,12 mm isolé deux couches soie et bobinés en nid d'abeilles superposés sur le même support en Bakélite.

Grandes ondes G.O.

Ils sont en fil de 0,12 mm bobinés de la même façon que les bobinages pour petites ondes.

Si f_i est la fréquence intermédiaire on a :

$$f_i = f_1 - f_2$$

f_1 et f_2 étant respectivement la fréquence de l'oscillateur et la fréquence d'accord d'entrée. En général la conversion de fréquence se fait par battement supérieur ($f_1 > f_2$). Quelquefois par battement inférieur en ondes courtes ($f_1 < f_2$).

c) Les trimmers T_1 à T_5.

Ce sont des condensateurs ajustables au mica de 3-35 pF qui permettent l'alignement du récepteur. En grandes ondes les trimmers doivent avoir une valeur plus élevée et ils sont doublés d'un condensateur fixe de 50 pF en parallèle.

d) Les paddings P_1 et P_2.

Les capacités d'accord doivent être plus faibles sur les circuits oscillateurs. Lorsqu'on emploie un C.V. de 490 pF sur ces circuits, on diminue la capacité au moyen des paddings montés en série avec le C.V. Leur valeur est de 130 - 160 pF sur grandes ondes et 450 pF maximum sur petites ondes. Il est inutile sur ondes courtes.

e) Commutateur.

C'est un commutateur à galettes à 3 positions.

Il en comporte une quatrième si le récepteur possède une prise P.U.

L'ensemble bobinages, condensateurs ajustables et commutateur sont montés sur le même bloc appelé bloc d'accord. Cette disposition permet de réduire la longueur des connexions et d'augmenter le rendement.

Le tableau 4-2 suivant indique les caractéristiques des bobinages utilisés.

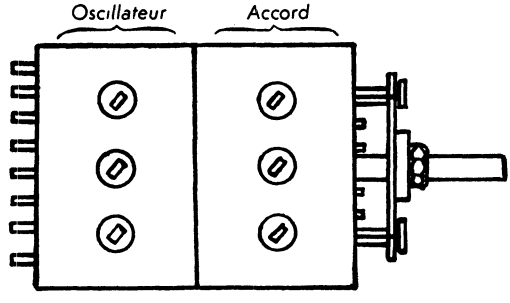


Fig. 4-36. — Bloc d'accord avec commutateur à galette

4° Différents modèles.

a) Bloc normal (fig. 4-36).

Il comporte un commutateur à galettes pour P.O. — G.O. — O.C. — P.U. Les bobinages d'accord et les bobinages oscillateurs sont séparés par un blindage.

Les paddings sont généralement fixes et les bobines et trimmers ajustables sur toutes les gammes. Ils sont associés avec un C.V. à 2 cages à 490 pF.

Ils peuvent recevoir un bloc de bobinages supplémentaire pour amplificateur H.F.

b) Bloc simplifié.

Divers modèles existent qui peuvent être utilisés sur récepteurs à amplification directe, sur récepteurs tous courants ou récepteurs portatifs (blocs miniatures) ou avec des circuits oscillateurs à couplage électronique (bobines montées en autotransformateur).

Une méthode utilisée pour simplifier le bloc consiste à utiliser une seule bobine au primaire pour P.O. et G.O. avec un seul trimmer réglé sur 1 400 kHz en P.O. La

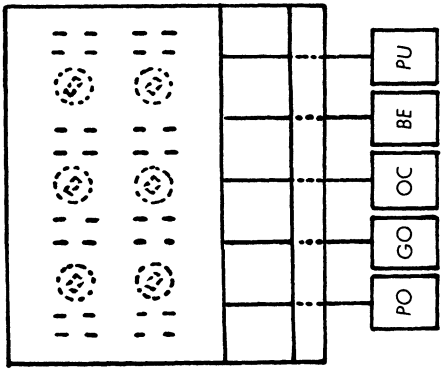


Fig. 4-37. — Bloc d'accord à touches

TABLEAU 4-2. — BLOC D'ACCORD : CARACTÉRISTIQUES DES BOBINAGES

		BOBINAGES D'ACCORD		BOBINAGES OSCILLATEURS	
		Nombre de spires	Inductance µH	Nombre de spires	Inductance µH
O.C.	Primaire	4 à 5	15	6,5 à 5,5	1
	Secondaire	6 à 8 9 à 10 sans vis	1,15 à 1,25	8 à 10	1,5
P.O.	Primaire	300 à 400	2 000 à 3 000	68 à 80	90
	Secondaire	90 à 110	180 à 205	10 à 15 suivant tube utilisé	10
G.O.	Primaire	500 à 600	10 000	140 à 160	440 à 460
	Secondaire	360 à 430	2 200	20 à 30 suivant tube utilisé	75

bobine primaire O.C. est montée en série au sommet. En O.C., la bobine P.O. - G.O. joue le rôle de bobine d'arrêt.

c) Bloc pour 4 gammes.

Il comporte 2 gammes ondes courtes améliorant leur réception :

O.C 1 : 12,5 à 23 m.
O.C 2 : 21,4 à 51,5 m.

Ils sont utilisés avec un condensateur variable à 2 cases (130 et 490 pF) ou (130 et 360 pF). La réception sur P.O. - G.O. dans ce deuxième cas est effectuée avec la mise en parallèle des 2 cases.

Une solution plus économique consiste à utiliser un C.V. à 2 cases (490 pF) et à connecter un condensateur fixe en série avec l'une des cases pour la réception en O.C.

d) Bloc à gammes étalées.

La réception en ondes courtes est améliorée sur certaines plages de fréquences. Ils comportent soit une bande étalée sur 49 m, soit deux bandes sur 41 et 49 m. L'étalement des gammes s'obtient en intercalant un condensateur fixe en série avec le condensateur variable. La figure 4-37 montre un tel bloc avec clavier à touches (1).

e) Bloc tropicalisé.

Ils comportent de 3 à 6 gammes.

La plage G.O. est supprimée et ils possèdent 2 à 5 gammes d'ondes courtes. Tous les bobinages sont imprégnés et protégés avec supports en polystyrène ou en stéatite. Ils sont utilisés avec condensateur variable à 2 cases (130 - 360 pF).

f) Bloc à noyau plongeur.

Certains constructeurs fabriquent des blocs pour postes portatifs dans lesquels les 2 condensateurs variables sont remplacés par 2 inductances variables par noyau plongeur en fer divisé. (Utilisés aussi en modulation de fréquence).

Cette solution originale permet de diminuer le poids et l'encombrement. D'autre part elle permet des gains élevés et constants sur toute la gamme, une sélectivité constante et une commande unique plus rigoureuse.

B - Bobinages de réception M.F.

1° Caractéristiques des transformateurs à F.I.

Les caractéristiques qui définissent les transformateurs à fréquence intermédiaire sont :

— L'inductance propre du circuit primaire.

(1) Les claviers à touches ou à poussoirs se sont généralisés sur les postes portatifs et sur postes auto. Beaucoup de récepteurs fixes en sont équipés. Le commutateur est à tiroirs au lieu d'être à galettes. Certains claviers comportent des touches pour tonalité, pour commande de sélectivité ou pour stations pré-réglées.

— L'inductance propre du circuit secondaire.

— La fréquence nominale d'emploi.
Elle a été normalisée à 455 kHz.

— Le facteur de qualité des circuits primaire et secondaire pour la fréquence d'accord ($Q = L\omega/R$).

— L'indice de couplage des circuits primaire et secondaire. C'est le produit du facteur de couplage des deux circuits d'un transformateur par la moyenne géométrique des facteurs de qualité de ces deux circuits :

$$i = k\sqrt{Q_1\,Q_2}$$

i : indice de couplage.

k : facteur de couplage.

Q_1 Q_2 : facteurs de qualité des primaire et secondaire.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1\,L_2}}$$

M : mutuelle inductance.

L_1, L_2 : inductances propres des primaire et secondaire.

Remarques :

L'indice de couplage s'exprime aussi par : $i = \dfrac{M\omega}{\sqrt{R_1\,R_2}}$

R_1 et R_2 étant les résistances des enroulements primaire et secondaire.

Lorsque $i = 1$: couplage critique;
Lorsque $i < 1$: couplage lâche;
Lorsque $i > 1$: couplage serré.

2° Essais.

Les essais comprennent deux catégories :

Les essais de type constitués par l'ensemble des essais mentionnés ci-dessous et les essais de contrôle effectués sur chaque transformateur et constitués par :

— l'essai diélectrique;
— la mesure de l'isolement;
— la vérification des caractéristiques.

L'ensemble des essais comprend :

— vérification d'ensemble (disposition des bornes et des cosses, dispositifs de fixation, organes de réglage, etc.).
— Essai diélectrique.
— Mesure de l'isolement.
— Vérification des caractéristiques mentionnées au paragraphe ci-dessus.
— Vérification de l'efficacité du blindage.
— Epreuve hygroscopique.

— Essai de résistance aux vibrations mécaniques.

— Stabilité de la fréquence nominale d'emploi en fonction de l'état hygrométrique de l'air ambiant, des vibrations mécaniques de la température de l'air ambiant.

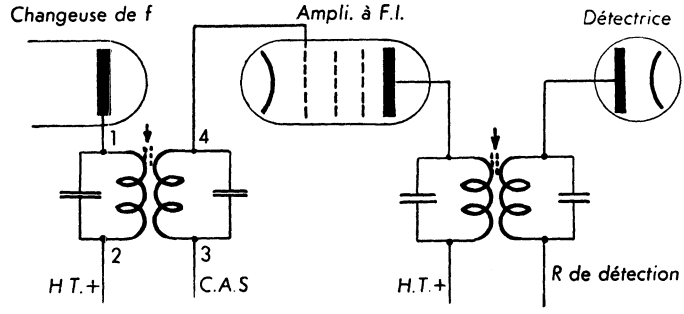


Fig. 4-38. — Transformateurs à fréquence intermédiaire

3° Descriptions des transformateurs à F.I.

(pour réception en modulation d'amplitude)

a) Premier transformateur.

Il est placé entre le tube changeur de fréquence et l'amplificateur à fréquence intermédiaire (fig. 4-38). La liaison des 4 sorties apparaît sur le schéma. Les sorties 1 et 4 doivent être les plus éloignées.

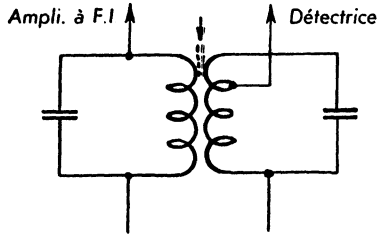


Fig. 4-39
Deuxième transfo. à F.I. (variante)

Le premier transformateur est réglé au couplage critique ou très légèrement au-dessus.

Ils peuvent être à haute impédance (L grand : 650 µH, C petit : 150 à 200 pF) ou à basse impédance (L petit : 350 µH, C grand : 300 à 350 pF). Dans ce dernier cas la qualité est inférieure et ils sont réservés à des constructions peu onéreuses. Les condensateurs sont au mica et réalisés indépendamment ou directement sur la plaquette support en carton bakélisé. Le fil est du fil divisé bobiné en nid d'abeilles sur supports bakélite ou polystyrène (qualité ordinaire) (fig. 4-41) ou bobiné en vrac sur poulie ou nid d'abeilles en pots (haute qualité : fig. 4-40). La figure 4-42 montre les courbes de sélectivité obtenues avec ces deux modèles.

b) Deuxième transformateur.

Il est placé entre le tube amplificateur à fréquence intermédiaire et la diode de détection (fig. 4-38). Leur construction est identique à celle du

premier transformateur sauf en ce qui concerne le couplage. En effet la diode introduisant un amortissement de l'étage précédent, pour le compenser on réalise un couplage plus serré (i = 1,2 à 1,4).

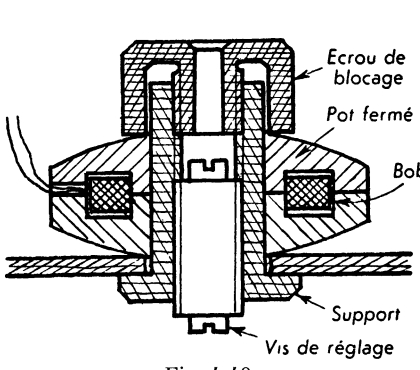


Fig. 4-40

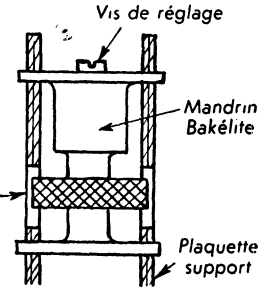


Fig. 4-41

Bobinages pour transfo. à F.I.

On peut aussi pour diminuer cet inconvénient utiliser un transformateur à prise intermédiaire ou secondaire (fig. 4-39).

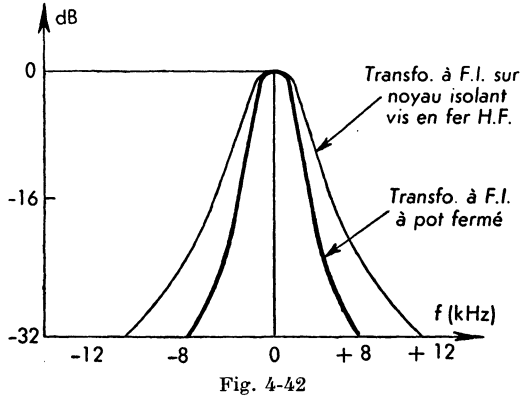


Fig. 4-42

4° Différents modèles.

a) Transformateurs normaux.

Il existe de nombreux modèles sous blindages parallélépipédiques ou cylindriques avec réglage par vis en bout ou le plus souvent latéral, l'accès étant facilité avec cette deuxième solution. Les figures 4-43 à 4-45 montrent quelques exemples.

b) Transformateurs miniatures.

Ils sont utilisés sur récepteurs portatifs et le plus souvent les bobinages primaire et secondaire sont superposés. Les figures 4-46 à 4-48 montrent quelques solutions adoptées.

Fig. 4-43 Fig. 4-44 Fig. 4-45

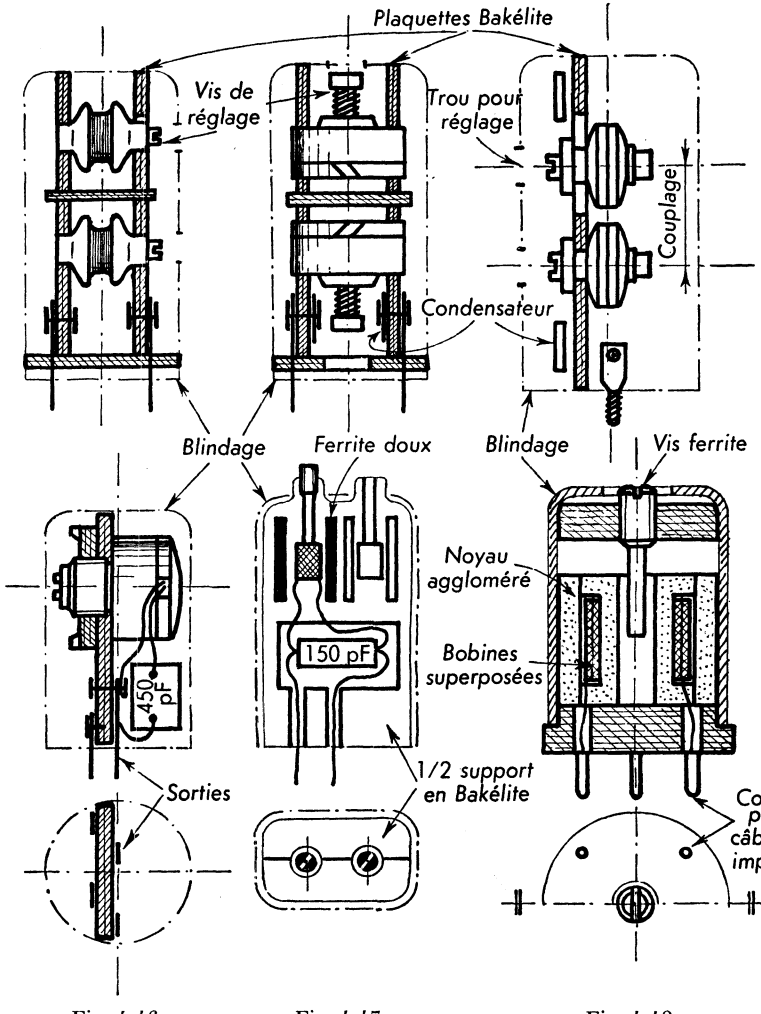


Fig. 4-46 Fig. 4-47 Fig. 4-48

Transformateurs à fréquence intermédiaire

c) Transformateurs à sélectivité variable.

On les emploie sur certains appareils de luxe. La sélectivité est modifiée par la rotation de l'une des bobines au moyen d'un système mécanique. La rotation modifie l'indice de couplage.

Un autre procédé consiste à ajouter ou retrancher des spires supplémentaires avec un commutateur. La sélectivité variable est appliquée au premier transformateur.

d) Transformateurs tropicalisés.

Ils sont adoptés sur matériel professionnel et les différences existant avec le matériel amateur sont les suivantes :

— Blindages plus épais (0,5 à 1 mm) en aluminium, cuivre ou mieux bimétal (Cu-Al-Cu).

— Fil divisé à 20 ou 30 brins de 0,05 mm, l'augmentation du blindage nécessitant une augmentation du nombre de spires.

— Supports en bakélite H.F. ou en stéatite.

— Protection extérieure par vernis fongicide.

e) Transformateurs à quartz.

Ils sont utilisés sur récepteurs professionnels en réception télégraphique. Le filtre à quartz permet d'obtenir une très grande sélectivité.

f) Transformateurs pour modulation de fréquence (F.M.).

Les considérations générales que nous avons vues pour la construction des bobinages H.F. sont applicables ici et les détails constructifs qui différencient les bobinages à fréquence intermédiaire pour F.M. sont dus à la valeur plus élevée de leur fréquence d'accord (10,7 MHz) et à la largeur de bande plus grande (225 kHz) pouvant nécessiter des résistances d'amortissement si l'amortissement naturel des circuits est insuffisant.

C - Bobinages d'arrêt H.F.

Ils sont utilisés dans différents circuits pour s'opposer au passage d'une fréquence H.F. Deux modèles pour matériel amateur sont représentés aux figures 4-49 et 4-50. Les fils de sortie axiaux permettent de les souder directement sur les circuits. La figure 4-51 représente un modèle professionnel sur support stéatite. Le fil émaillé est recouvert d'une couche soie et l'ensemble est protégé par un vernis silicone. Le bobinage est fractionné en galettes pour diminuer la capacité répartie.

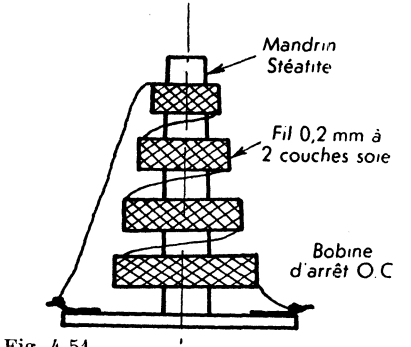


Fig. 4-51

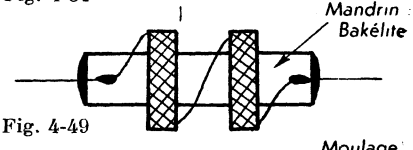


Fig. 4-49

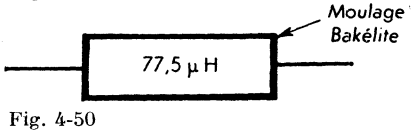


Fig. 4-50

D - Bobinages pour télévision.

1° Bobinages pour V.H.F.

Les fréquences étant comprises entre 30 et 300 MHz les bobines possèdent beaucoup moins de spires. Le fil est plein, assez gros et dans l'air. Pour diminuer les pertes par effet pelliculaire il peut être argenté. Ces bobinages de

quelques spires sont parfois munis d'une vis de réglage magnétique (fig. 4-52). Sur circuits imprimés les bobinages sont réalisés directement sur la plaquette support en forme de spirale circulaire ou carrée (fig. 4-53). Ces bobines sont montées avec les autres éléments des circuits haute fréquence, sur le rotateur qui permet d'adapter les circuits au canal reçu.

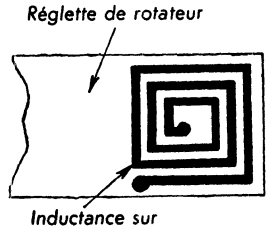


Fig. 4-53

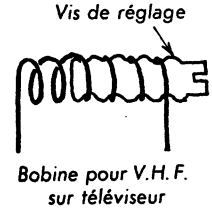


Fig. 4-52

2° Bobinages pour fréquence intermédiaire.

Les différences existant avec les bobinages pour récepteurs radio sont dues au fait que les fréquences sont beaucoup plus élevées : 39,15 MHz pour la fréquence intermédiaire son et aux environs de 28 MHz pour la fréquence intermédiaire image.

Les bobinages comportent beaucoup moins de spires. Les capacités parallèles sont souvent inexistantes (ou de quelques pF) car on utilise la capacité répartie des bobinages. Pour la fréquence image la bande passante est très large (11,15 MHz) et les circuits doivent être amortis. Si l'amortissement naturel est insuffisant on place une résistance de 1 à 5 kΩ en parallèle sur la bobine.

3° Bobinages pour balayage lignes.

La puissance nécessaire au balayage lignes est importante et la résistance du bobinage doit être faible. La fréquence du balayage est de 20 475 Hz et la bande passante doit être au moins 200 kHz de manière à transmettre les dents de scie sans déformation excessive. Les capacités parasites doivent être faibles d'où utilisation de bobinages en nid d'abeilles.

Pour avoir un rendement élevé on utilise généralement un autotransformateur qui donne un couplage plus élevé qu'un transformateur. La surtension obtenue pendant le retour de balayage est utilisée pour l'obtention de la T.H.T. (12 à 18 kV) utilisée sur l'anode post-accélératrice du cinescope. Pour éviter l'effet couronne sur ce bobinage on l'entoure d'un « pneu isolant ». L'imprégnation se fait à l'Araldite ou au polystyrène. Le circuit magnétique est un noyau en ferrite en double U. Le chauffage de la valve T.H.T. est assuré à partir de quelques spires à haut isolement.

La figure 4-54 montre une des dispositions adoptées pour les transformateurs de sortie lignes.

4° Autres bobinages pour télévision.

Ils sont très nombreux (réjecteurs, linéarité, correction...) et leur construction utilise les principes généraux que nous avons étudiés. Les bobinages pour cinescopes ont été entrevus au chapitre I.

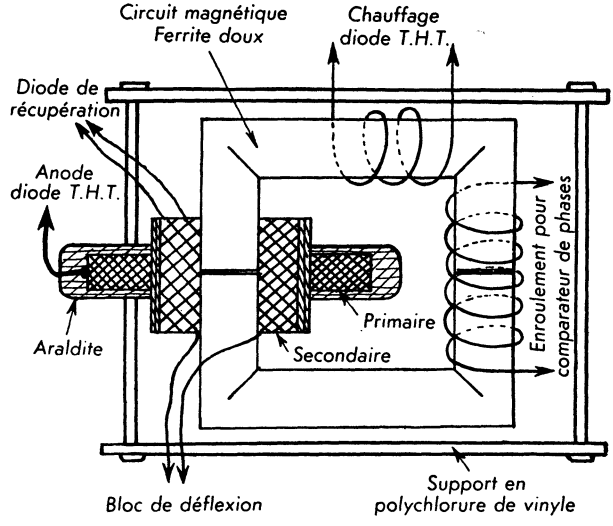


Fig. 4-54. — Transformateur lignes pour téléviseur

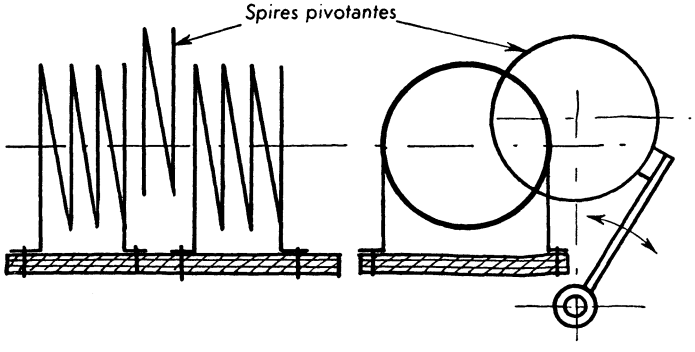


Fig. 4-55. — Bobinages pour émission

E - Bobinages pour émission.

Bien que pour les petites puissances on rencontre quelques bobinages sur noyaux en fer divisé, les bobinages pour émission sont presque toujours « bobinés dans l'air ».

Suivant la puissance mise en jeu, on emploie du fil de cuivre depuis quelques dixièmes de mm bobiné en nid d'abeilles jusqu'à du tube de 2 à 3 cm de diamètre enroulé en hélice. Les supports sont des barres à encoches en porcelaine ou en stéatite. En ondes courtes le bobinage est simplement maintenu à ses extrémités.

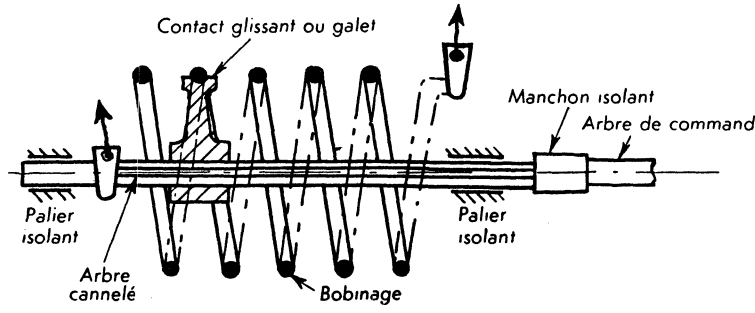


Fig. 4-56

Les bobinages pour circuits oscillants comportent des prises mobiles pour faciliter le réglage initial, ou des prises fixes régulièrement espacées. Le réglage des bobinages peut être obtenu par une ou plusieurs spires en court-circuit dont le couplage peut être rendu variable avec l'enroulement principal (variomètre) ou encore par contact glissant le long des spires (fig. 4-56).

Le couplage de deux enroulements peut être modifié en déplaçant l'un des enroulements par rapport à l'autre ou par un enroulement comportant une ou plusieurs spires en court-circuit dont le couplage avec les enroulements principaux peut être modifié par basculement (fig. 4-55).

En ondes courtes les tubes utilisés sont argentés. Les tubes peuvent être refroidis par circulation d'air ou d'eau distillée.

En ondes ultra-courtes (au-dessus de 20 MHz) les inductances sont constitués par des tubes de cuivre argenté parallèles : lignes de Lecher. Au-delà de 100 MHz ce sont des tubes coaxiaux en cuivre argenté.

V. NORMES.

C 93-320 : Ferrites magnétiques doux (1961).

CCTU 06-02 : Circuits magnétiques en pots de ferrite et accessoires associés (1960).

FNIE 007 : Circuits en ferrite pour transformateurs : caractéristiques (1958).

CCTU 06-04 : Circuits magnétiques en pots de ferrite à coefficient de température défini voisin de zéro (1961).

CCTU 06-06 : Accessoires pour circuits magnétiques en pots de ferrite (1962).

CHAPITRE 5

LES MICROPHONES (1)

I. GÉNÉRALITÉS.

A - Définitions.

Vibration acoustique : Mouvement des particules d'un milieu élastique de part et d'autre d'une position d'équilibre.

Acoustique : Partie de la science et de la technique relative à l'étude des vibrations acoustiques et concernant leur production, leur propagation et leurs effets.

Son : Sensation auditive engendrée par une onde acoustique ou par extension, vibration acoustique capable d'éveiller une sensation auditive.

Grandeur périodique : Grandeur qui se reproduit identiquement à des intervalles égaux d'une variable dont elle dépend (temps, espace, etc).

Fréquence fondamentale : Fréquence d'une grandeur sinusoïdale ayant même période que la grandeur périodique.

Harmonique : Grandeur sinusoïdale dont la fréquence est un multiple entier de la grandeur fondamentale.

Infrason : Vibration acoustique de fréquence trop basse pour éveiller une sensation auditive.

Ultrason : Vibration acoustique de fréquence trop élevée pour éveiller une sensation auditive.

Champ acoustique : Région de l'espace dans laquelle existent des vibrations acoustiques.

Bel, décibel : Unités sans dimension utilisées, en principe, pour exprimer le rapport des valeurs de deux puissances, le nombre de bels étant égal au logarithme décimal de ce rapport.

Le décibel est le dixième du bel (dB).

(1) Les chapitres 5 à 8 traitent des transducteurs électro-acoustiques (microphones, haut-parleurs, lecteurs phonographiques) et une grande partie des généralités examinées au chapitre « microphones » concernant les définitions et les rappels d'acoustique sont valables pour les chapitres suivants.

Si P_1 et P_2 représentent deux valeurs de puissances, le nombre de décibels correspondant à leur rapport est :

$$n = 10 \lg P_1/P_2.$$

Quand le rapport de deux grandeurs est égal à la racine carrée du rapport des puissances correspondantes, le nombre n de décibels représentant ce rapport est :

$$n = 20 \lg I_1/I_2, \qquad n = 20 \lg V_2/V_1,$$
$$n = 20 \lg v_1/v_2, \qquad n = 20 \lg p_1/p_2,$$

où I_1/I_2, V_2/V_1, v_1/v_2, p_1/p_2 sont respectivement les rapports de courants, de tensions, de vitesses et de pressions données.

Pression acoustique : En un point d'un fluide c'est la différence entre la pression existant à un instant donné et la pression qui existerait en l'absence de toute vibration acoustique.

Vitesse acoustique : Vitesse instantanée d'une particule. (Ne pas confondre avec la vitesse du son qui est la vitesse de propagation des ondes sonores souvent appelée célérité).

Volume acoustique : Dans un circuit électrique, grandeur électrique qui est fonction de la puissance vocale (ou musicale) mesurée en un point déterminé au moyen d'un appareil spécifié (volumètre).

Source acoustique simple : Source acoustique rayonnant uniformément dans toutes les directions, en champ libre.

Système acoustique : Système capable d'engendrer, de transmettre ou de recevoir des vibrations acoustiques.

Système acoustique stéréophonique : Système acoustique donnant aux observateurs, lors de la reproduction des sons, une sensation de distribution spatiale.

Transducteur : Dispositif qui, sous l'action d'ondes provenant d'un ou de plusieurs systèmes ou milieux de transmission, fournit, à un ou plusieurs autres systèmes ou milieux, des ondes correspondant à celles qu'il reçoit.

Efficacité (ou réponse) d'un transducteur : Expression quantitative du quotient d'une grandeur déterminée mesurée à la sortie d'un transducteur, par une autre grandeur déterminée, mesurée à l'entrée, dans des conditions de fonctionnement données à ce transducteur.

Caractéristique (courbe) de réponse : Loi de variation, souvent représentée graphiquement, d'une réponse en fonction d'une certaine variable indépendante telle que fréquence, angle, etc.

Centre acoustique d'un transducteur émetteur de son : Point d'où semblent provenir les ondes acoustiques engendrées par le transducteur, lorsqu'elles sont perçues à un emplacement où elles sont assimilables à des ondes sphériques.

Axe principal d'un transducteur électro-acoustique : Direction de référence devant être clairement spécifiée, servant d'origine, dans la représentation en coordonnées polaires, des caractéristiques directionnelles du transducteur.

Diagramme directionnel : Pour une fréquence donnée, représentation de la réponse d'un transducteur électro-acoustique en fonction de la direction de propagation de l'onde dans un plan déterminé passant par le centre acoustique de la source.

Perte (ou gain) de déviation angulaire : Différence entre la réponse, en décibels, d'un transducteur électro-acoustique, mesurée suivant son axe principal, et la réponse, en décibels, pour une direction faisant un angle donné avec l'axe principal.

Facteur de directivité : Pour un transducteur émetteur de son, à une fréquence donnée, rapport du carré de la pression acoustique rayonnée mesurée en un point donné de l'axe principal du transducteur, en champ libre, à la moyenne des carrés des pressions sur la surface d'une sphère ayant le transducteur pour centre et passant par le point précité.

Pour un transducteur récepteur de son, à une fréquence donnée, rapport du carré de la force électromotrice produite par les ondes acoustiques arrivant parallèlement à l'axe principal, à la moyenne des carrés des forces électromotrices qui seraient produites par des ondes acoustiques ayant chacune même fréquence et même pression efficace que celle des ondes précédemment considérées, et parvenant au transducteur simultanément de toutes les directions.

Indice de directivité d'un transducteur : En décibels 10 fois le logarithme décimal de son facteur de directivité.

Rendement d'un transducteur récepteur de son : Rapport entre la valeur d'une certaine grandeur physique utilisable à la sortie du transducteur et la valeur totale de cette même grandeur existant à son entrée.

Microphone : Tranducteur électro-acoustique permettant d'obtenir des ondes électriques à partir d'ondes acoustiques.

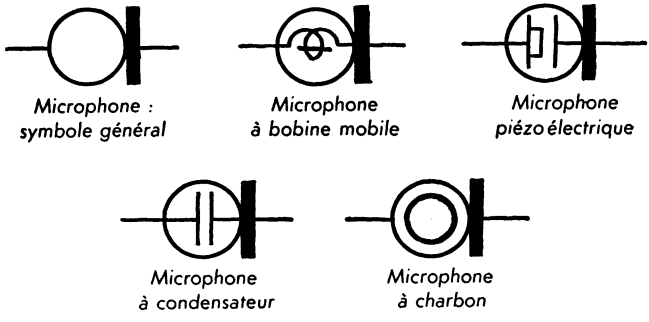


Fig. 5-1 à Fig. 5-5.

B - Représentation schématique.

Les symboles graphiques tirés de la norme NF C 03-390 sont donnés par les figures 5-1 à 5-5.

C - Rappel de notions d'acoustique.

L'air, milieu élastique, transmet les vibrations acoustiques à la vitesse de 340 m/s (air sec, à 18 °C, au niveau de la mer). Les sensations auditives engendrées par ces vibrations sont très variables. Les sons produits par divers instruments ou autres sources sonores sont caractérisés par leur hauteur, leur intensité, leur timbre, et les transitoires.

1° Hauteur.

Elle est fixée par la valeur de la fréquence fondamentale. En musique les hauteurs sont désignées par des notes.

Du point de vue physiologique, lorsque les hauteurs varient en progression géométrique, la sensation de l'oreille varie en progression arithmétique. Cette loi logarithmique valable pour d'autres sensations physiologiques est dite loi de Fechner.

Cela revient à dire que deux intervalles de sons seront identiques pour l'oreille quand le rapport des fréquences correspondantes sera le même.

2° Intensité acoustique.

Elle est fonction de la puissance acoustique instantanée.

La sensibilité de l'oreille à l'intensité des sons suit une loi logarithmique comme pour la hauteur. Il est commode d'exprimer les intensités sonores en décibels. Le niveau d'intensité acoustique s'exprime alors par :

$$n = 10 \lg I_1/I_0,$$

L'intensité de référence I_0 est celle qui correspond à l'intensité minimale perceptible par l'oreille humaine à 1 000 Hz.

La « dynamique » orchestrale, c'est-à-dire la différence entre le « piano » et le « forte » atteint 45 dB. Pour obtenir un effet artistique convenable à l'audition, le « fortissimo » doit tomber dans les limites 90-100 dB et le « pianissimo » entre 45 et 55 dB pour dépasser suffisamment le niveau du bruit de la salle.

3° Timbre.

C'est le caractère de la sensation auditive permettant de distinguer divers sons complexes de même fréquence fondamentale mais de compositions spectrales différentes.

Un son musical de bonne qualité doit avoir une puissance des harmoniques inférieure à celle du son fondamental.

4° Transitoires.

Ils caractérisent la façon dont les sons apparaissent (attaque) ou disparaissent.

Les bruits qui n'ont pas de composantes bien définies (sons non décomposables en séries de Fourrier) ont des attaques à front raide souvent délicates à reproduire.

5° Audiogramme (fig. 5-6).

Si nous portons sur un graphique les puissances minimales perceptibles par l'oreille pour chaque fréquence, on obtient une courbe dite « *seuil d'audition* ». Si nous portons maintenant pour chaque fréquence la puissance acoustique pour laquelle l'audition devient douloureuse nous obtenons une nouvelle courbe dite « *seuil d'audition intolérable* ». Ces courbes correspondent à des valeurs statistiques établies pour un grand nombre d'adultes jeunes à oreilles normales. La surface comprise entre les deux courbes s'appelle « *aire d'audition* ».

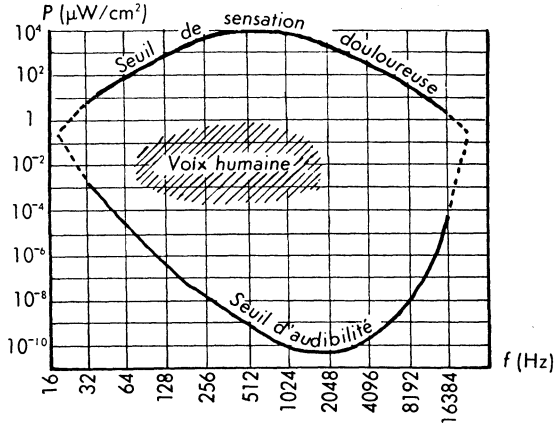


Fig. 5-6. — Audiogramme.

Bien que le domaine des fréquences audibles s'étende de 16 Hz à 16 000 Hz pour un auditeur normal moyen une reproduction d'orchestre de haute qualité se contente de l'intervalle 50 Hz-9 000 Hz. En téléphonie l'intervalle 100 Hz-3 000 Hz est suffisant pour l'intelligibilité de la parole.

En radiophonie la distribution des fréquences des émetteurs à modulation d'amplitude ne permet pas de dépasser 9 kHz, largeur de bande réservée à chaque émetteur. Pour éviter les interférences avec les émetteurs voisins ou les parasites on limite souvent les fréquences élevées à 4 000 Hz, ce qui donne un effet satisfaisant pour les auditeurs peu difficiles. En radiophonie la recherche de la qualité doit surtout être orientée vers la diminution des parasites ou du niveau de bruit de fond auxquels l'auditeur moyen est beaucoup plus sensible. Par ailleurs physiologiquement le cerveau arrive à reconstituer des harmoniques manquants, par addition de fréquences.

6° Distorsions.

On appelle distorsion toute déformation d'un son pendant sa propagation ou sa reproduction par les appareils électro-acoustiques.

a) Distorsion d'amplitude (ou non-linéaire, ou harmonique).

Elle est provoquée par la non-linéarité du procédé de transmission. Au signal d'entrée se trouvent superposés des harmoniques à la sortie. Pour que l'audition ne soit pas désagréable, le taux d'harmoniques (1) doit rester inférieur à 5 % pour les installations ordinaires et à 1 ou 2 % pour la haute fidélité. Dans ce dernier cas la bande de fréquences étant plus large, les harmoniques produits sont mieux transmis.

La distorsion non-linéaire qui donne une rudesse désagréable au son reproduit est de peu d'importance sur l'intelligibilité de la parole et le taux peut atteindre 15 % en téléphonie.

b) Distorsion linéaire.

Elle a lieu lorsque les différentes fréquences ne sont pas transmises également. La proportion des intensités sonores n'est pas respectée et le timbre s'en trouve affecté.

Les fréquences limites au-delà desquelles les sons ne sont plus reproduits sont dites « *fréquences de coupure* ». La prédominance exagérée de certaines fréquences est appelée vulgairement « *résonance* ». Les sons favorisés dominent et couvrent les autres sons.

Les distorsions linéaires sont mises en évidence en traçant la « *caractéristique de réponse* ». On porte en abcisses les fréquences sur une échelle logarithmique et en ordonnées les décibels. Une caractéristique de réponse est considérée comme idéale lorsque c'est une droite parallèle à l'axe des abcisses. Pratiquement des distorsions peuvent être admises sans inconvénient. En effet les résonances ne sont pas sensibles si elles sont accompagnées de contre-résonances dans leur voisinage immédiat (± 10 %). Nous avons vu d'autre part que les fréquences de coupure peuvent être plus ou moins rapprochées suivant qu'il s'agit de téléphonie, de radiophonie ou de haute fidélité.

La linéarité est la condition de la qualité du son mais pour autant qu'il soit reproduit avec son intensité originale car si le niveau sonore diffère, l'oreille évalue différemment la proportion des intensités des composantes.

c) Distorsion de phase.

Elle a lieu quand le temps de transmission est différent pour les diverses fréquences. Un déphasage de l'ordre d'une période d'oscillation n'est pas du tout perçu par l'oreille car physiologiquement les composantes sont analysées par des terminaisons différentes du nerf auditif.

d) Distorsion par transmodulation.

Elle est produite lorsque deux fréquences différentes appliquées à l'entrée d'un amplificateur produisent à la sortie des fréquences sommes ou différences des fréquences d'entrée. Cette distorsion introduite est surtout sensible avec l'utilisation de tubes pentodes.

(1) Taux d'harmoniques $K = \sqrt{\frac{\Sigma\, a^2_n}{a^2}}$ dans lequel a_0 représente la valeur efficace du signal sinusoïdal à la sortie et $\Sigma\, a_n$ la valeur efficace de tous les sons harmoniques produits par le procédé.

e) Distorsion de la dynamique.

Nous avons vu que la dynamique orchestrale naturelle représente 45 dB. Les procédés techniques de transmission ne permettent pas de transmettre les intensités dans de telles proportions. On réduit la dynamique en dessous de 25 dB en augmentant le niveau des sons faibles (augmentation du rapport signal-bruit de fond) et en réduisant le niveau des sons forts (évite la saturation de la caractéristique du procédé de reproduction). Cette opération s'appelle la « *compression de contrastes* » et elle est réalisée, à l'émission ou à l'enregistrement, manuellement par un opérateur. En audition ordinaire, la distorsion de la dynamique est peu importante en regard des autres distorsions. Dans les installations de haute qualité ce défaut est décelable par les auditeurs musiciens et on y remédie par l'opération inverse appelée « *expansion de contrastes* » obtenue par un dispositif automatique.

f) Distorsion spatiale.

Elle est due, d'une part à l'ensemble des distorsions précédentes qui ne permettent pas de localiser le son en profondeur et rappellent à l'auditeur la présence du mécanisme de transmission, d'autre part au fait que la localisation spatiale des sons n'est pas possible avec les appareils ordinaires. Le « *relief sonore* » dans l'audition naturelle, c'est-à-dire la localisation des sons en largeur (ou hauteur) est due à la sensation « *binaurale* » (par les deux oreilles).

Pour rétablir l'effet de profondeur il faut tout d'abord réduire de façon très stricte les différentes distorsions. Du moment où l'installation est dépourvue de distorsions à un degré satisfaisant on obtient un effet de perspective sonore dû à la « *réverbération* » de la salle où la prise de son est effectuée. La réverbération est la persistance d'un son dans un espace clos ou semi-clos après interruption de la source acoustique. Des dispositifs de réverbération artificielle sont utilisés pour recréer cette impression. Ils consistent à provoquer un déphasage dans le temps entre les sons de deux canaux à partir d'un premier canal sonore initial unique.

Pour obtenir la localisation en largeur des sons on utilise la « *stéréophonie* » qui consiste à utiliser deux canaux (ou plus) de transmission séparés, depuis les microphones jusqu'aux haut-parleurs. La distribution des hauts-parleurs pour la reproduction doit correspondre aux positions des microphones dans la salle de prise de son.

D - Caractéristiques.

1° Efficacité (ou sensibilité).

C'est l'aptitude d'un microphone à donner des tensions de sortie importantes pour des sons relativement faibles.

Pour une fréquence donnée, l'efficacité d'un microphone s'exprime par le rapport entre la tension alternative obtenue aux bornes de sortie et la pression acoustique correspondante appliquée sur le diaphragme.

Cette définition est valable pour une tension de sortie mesurée en circuit ouvert et pour des ondes sonores se propageant suivant l'axe du microphone.

L'efficacité peut aussi être exprimée en dB. Mais pour pouvoir comparer les sensibilités de divers appareils il y a lieu de choisir un niveau de référence qui doit toujours être explicité avec précision.

Le niveau de référence (0 dB) généralement choisi est celui qui correspond à une tension de sortie de 1 volt pour une pression acoustique de 0,1 pascal (ou une puissance acoustique de 1 $\mu W/cm^2$ à 1 000 Hz). Dans ce cas, l'efficacité s'écrit (1) :

$$S = 20 \lg U$$

U : tension de sortie en volts (V).

S : efficacité en décibels (dB).

Le calcul de l'efficacité peut aussi s'effectuer avec les puissances électriques de sortie, la puissance correspondante au niveau de référence précédent étant de 0,006 W. L'efficacité s'écrit alors :

$$S = 10 \lg \frac{P}{0{,}006}$$

P : puissance de sortie en watts (W).

S : efficacité en décibels (dB).

Le niveau de référence précédent sera utilisé dans la suite du texte et ne sera plus précisé. Les efficacités correspondantes des différents types de microphones sont comprises entre — 100 dB et — 25 dB.

2° Fidélité.

C'est l'aptitude d'un microphone à se comporter de la même façon pour toutes les fréquences audibles.

Cette qualité est mise en évidence au moyen de la caractéristique de réponse. On porte sur un graphique la sensibilité exprimée en décibels en fonction des différentes fréquences (échelle logarithmique). Le niveau de référence choisi peut être arbitraire car il ne change pas la forme de la courbe obtenue.

La fidélité suppose la transmission d'une bande de fréquences aussi large que possible (pour la parole la transmission des fréquences basses est plutôt nuisible pour l'intelligibilité), on remarque que plus un microphone est fidèle, moins il est sensible.

3° Directivité.

Un microphone devra être plus ou moins directif suivant les utilisations auxquelles on le destine, c'est-à-dire avoir une sensibilité égale ou au contraire différente en fonction de la direction des ondes sonores par rapport à l'axe principal du microphone. Les propriétés directives sont mises en évidence au moyen d'un diagramme directionnel. Pour chaque fréquence on trace une courbe en coordonnées polaires, l'origine des angles étant l'axe principal

(1) Si le niveau référence est choisi pour une pression acoustique de 1 pascal il faut ajouter 20 dB au nombre obtenu.

du microphone. La longueur portée sur chaque rayon correspond à l'efficacité dans la direction correspondante.

Nous verrons plus loin que les microphones à pression sont peu directifs et les microphones à vitesse directifs. Les effets directifs sont par ailleurs plus accentués pour les fréquences élevées ce qui présente une grande importance dans la transmission de l'intensité de la tonalité. (Il ne peut y avoir d'effet directif si les dimensions du microphone sont négligeables par rapport à la longueur d'onde.

4° Puissance.

Elle dépend de la tension maximale recueillie à la sortie. Elle permet de calculer l'amplification nécessaire.

5° Profondeur de champ.

Elle montre à quelle distance du microphone doit être placée la source pour obtenir le meilleur résultat.

6° Impédance de sortie.

C'est elle qui impose les organes de liaison à l'amplificateur. Suivant sa valeur le microphone peut être relié à une ligne, au primaire d'un transformateur ou directement à la grille du premier tube amplificateur.

On ne doit surtout pas faire débiter un appareil d'impédance donnée dans une impédance plus faible, à cause de la distorsion linéaire. Il y a moins d'inconvénient à relier un microphone d'impédance faible à une impédance plus élevée car s'il y a une faible perte de niveau il n'y a pas de distorsion.

7° Intelligibilité.

C'est une caractéristique des microphones téléphoniques. Nous avons vu que l'intelligibilité de la parole n'est pas synonyme de fidélité, puisque la transmission des fréquences basses est plutôt nuisible. Elle revêt une grande importance pour la transmission en milieu bruyant. On emploie pour la caractériser, le taux d'intelligibilité aux *logatomes* (combinaisons de syllabes dépourvues de sens).

8° Caractéristiques diverses.

Un certain nombre de qualités telles que l'étanchéité, la plage de températures, la conservation des propriétés en altitude, etc., sont nécessaires pour les applications particulières.

Les modèles tropicalisés résistent aux températures élevées à l'humidité, à l'air salin et aux vapeurs chimiques.

E - Classification des microphones.

1° Du point de vue acoustique.

La propagation des ondes sonores se fait avec modification des propriétés du milieu dans lequel elles se propagent. Lorsque le son se propage, la pression de l'air varie périodiquement par suite des oscillations des molécules dans le sens de la propagation. Les pressions instantanées se transmettent de proche en proche à la vitesse définie comme vitesse du son.

L'intensité sonore est liée à l'amplitude du déplacement des molécules correspondant à la pression maximale. La vitesse maximale (dite aussi vélocité) (1) qu'atteignent les molécules dans ce mouvement vibratoire est proportionnelle à la pression maximale.

Les microphones peuvent être classés du point de vue acoustique en deux groupes :

a) Les microphones à pression.

Ceux-ci fonctionnent essentiellement sous l'effet de la pression acoustique instantanée. Dans ce cas le mouvement de la membrane est pratiquement nul et seule la pression existant sur cette dernière détermine le fonctionnement du système traducteur.

b) Les microphones à vitesse.

Ceux-là fonctionnent essentiellement sous l'effet de la vitesse acoustique instantanée. Dans ce cas la membrane, sans inertie, libre sur ses deux faces se déplace théoriquement à la vitesse égale à celle des molécules de l'air.

2° Du point de vue directivité.

a) Microphone omnidirectionnel (non directionnel).

C'est un microphone dont la réponse est pratiquement indépendante de la direction de l'onde acoustique incidente.

C'est le cas des microphones à pression pour des fréquences basses inférieures à 800 Hz (fig. 5-7).

b) Microphone semi-directionnel.

C'est un microphone dont la réponse est pratiquement indépendante de la direction de l'onde acoustique incidente dans un angle solide de 2π.

On obtient ce résultat par association de deux ou plusieurs microphones (*microphones multiples* appelés encore microphones mixtes). La combinaison d'un microphone à vitesse et d'un microphone à pression donne des courbes de directivité du type cardioïde (2) (fig. 5-8). Bien que théoriquement l'effi-

(1) La vélocité est une vitesse qui vient se superposer à la vitesse des molécules due à l'agitation thermique et à la vitesse moyenne correspondante à des déplacements d'ensemble tels que le vent.

(2) La cardioïde a pour équation polaire $e = e_0 (1 + \cos \theta)$.

cacité diminue sensiblement au-delà d'un angle de 90°, des dispositifs compensateurs permettent d'obtenir une efficacité pratiquement constante dans un angle de 180°.

c) Microphone unidirectionnel.

C'est un microphone directionnel dont la réponse présente un maximum accentué dans la direction de l'onde acoustique incidente.

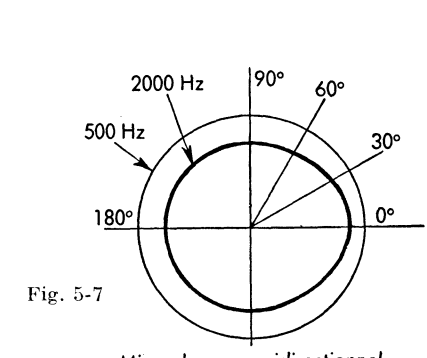


Fig. 5-7

Microphone omnidirectionnel

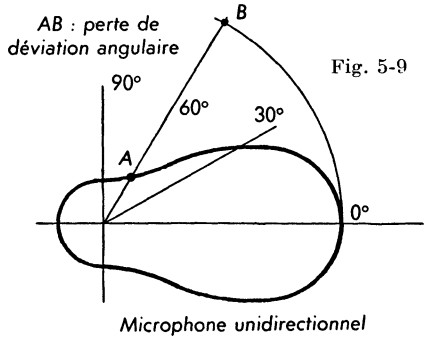
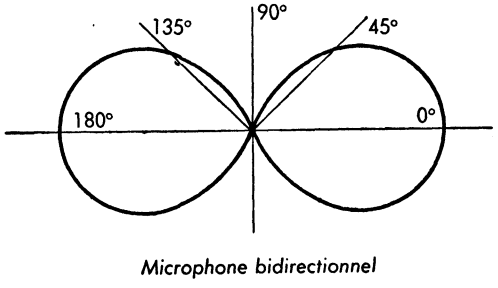


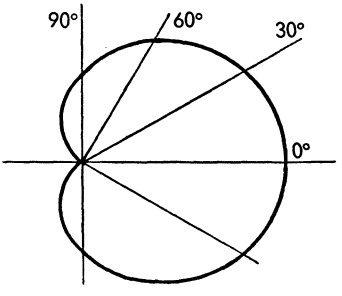
Fig. 5-9

Microphone unidirectionnel



Microphone bidirectionnel

Fig. 5-10



Microphone cardioide

Fig. 5-8

Fig. 5-7 à Fig. 5-10. — Différents types de directivité des microphones.

C'est le cas des microphones à pression pour des fréquences élevées de plusieurs kHz (fig. 5-9).

d) Microphone bidirectionnel.

C'est un microphone directionnel dont la réponse présente un maximum accentué pour deux directions, généralement opposées, des ondes acoustiques incidentes.

Les microphones à vitesse dont la membrane légère réagit aux ondes acoustiques arrivant sur ses deux faces donnent des diagrammes présentant deux maximas opposés et une zone de silence dans la direction perpendiculaire (fig. 5-10).

3° Du point de vue fonctionnel.

Les microphones sont dit *passifs* lorsqu'on les introduit dans un circuit comme élément variable et *actifs* lorsqu'ils fonctionnent en générateurs. Dans ce deuxième cas leur fonctionnement est réversible. On distingue :

a) Microphone à charbon.

Microphone dont le principe de fonctionnement repose sur les variations de la résistance électrique de contact des charbons.

b) Microphone électrostatique (ou à condensateur).

Microphone dont le principe de fonctionnement repose sur les variations de capacité d'un condensateur.

c) Microphone piézo-électrique.

Microphone dont le principe de fonctionnement repose sur les propriétés piézo-électriques de certains corps.

d) Microphone électromagnétique.

Microphone dont le principe de fonctionnement repose sur les variations de réluctance d'un circuit magnétique.
(Les termes « microphone à réluctance variable » et « microphone à fer mobile » sont à éviter).

e) Microphone électrodynamique (ou à conducteur mobile).

Microphone dont le principe de fonctionnement repose sur la création d'une force électromotrice dans un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique.

Il existe deux modèles :

— Le *microphone à bobine mobile* dans lequel le conducteur a la forme d'une bobine.

— Le *microphone à ruban* dans lequel le conducteur a la forme d'un ruban mince soumis à l'action directe des ondes acoustiques.

f) Microphones spéciaux.

Les microphones précédents sont à peu près les seuls à être utilisés pratiquement mais il existe d'autres types très divers qui seront peut-être utilisés dans l'avenir. Parmi les principaux nous pouvons citer :

— *Le microphone à magnétostriction* [1] qui repose sur les propriétés magnéto-strictives de certains corps.

— *Le microphone électronique* dont le principe repose sur les variations du flux électronique dans un tube à vide, sous l'action du déplacement d'une des électrodes du tube.

[1] Magnétostriction : phénomène de déformation élastique qui accompagne l'aimantation.

— Le *microphone ionique* dont le principe de fonctionnement repose sur les variations d'impédance d'un volume d'air ionisé.

— Le *microphone thermique* (à fil chaud) dont le principe repose sur les variations de résistance d'un conducteur produites par les variations de sa température, sous l'effet d'ondes acoustiques.

4° Du point de vue utilisation.

a) Microphone de proximité (ou de bouche).

Microphone conçu pour être placé tout près de la bouche du parleur.

b) Microphone labial.

Microphone conçu pour être placé au contact des lèvres du parleur.

c) Laryngophone.

Microphone conçu pour être placé au contact de la gorge du parleur et fonctionnant sous l'effet des mouvements du larynx.

Ce type de microphone ne doit pas être sensible aux vibrations de l'air mais aux vibrations mécaniques de la gorge. Certains sons n'ont plus les mêmes caractéristiques que ceux de la parole ordinaire. L'appareil doit avoir une courbe de réponse correspondante aux modifications, de façon que le timbre ne soit pas trop dénaturé.

Les laryngophones permettent de téléphoner dans des endroits où le bruit de fond est très élevé, et d'un niveau acoustique supérieur à celui de la parole : cabine d'avion, chantier de construction, chaudronnerie, mines.

d) Sonde microphonique (ou microphone sonde).

Microphone permettant d'explorer un champ acoustique, sans le perturber sensiblement. Cet appareil permet la localisation de bruits anormaux dans des endroits difficilement accessibles sur machines-outils, moteurs, turbines, etc.

II. MICROPHONES A CHARBON.

A - Principe (fig. 5-11).

1° Description.

Le microphone comporte un support dans l'alvéole duquel se trouvent des grains de graphite sur lesquels appuie une membrane (ou diaphragme) en graphite.

La variation de pression acoustique est transmise sur les grains par la membrane. Il s'ensuit une modification de la surface des points de contact entre grains, le système constituant ainsi une résistance variable.

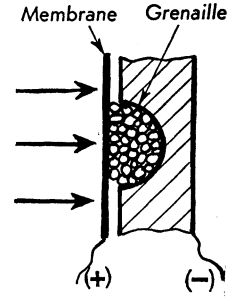


Fig. 5-11
Principe d'un microphone à charbon.

On alimente le microphone en courant continu et le primaire du transformateur d'adaptation est parcouru par un courant ondulé dont la fréquence correspond à celle des ondes acoustiques agissant sur la membrane.

2° Fabrication des granules.

Les granules sont formés soit par de la grenaille de graphite aux arêtes vives, soit par des billes sphériques moulées en graphite ou des billes creuses en charbon végétal.

Les granules en graphite sont obtenus à partir d'anthracite soumis à une cuisson dans des conditions thermiques précises. Un traitement à l'acide chlorhydrique réduit ensuite la teneur en cendres. La matière obtenue est placée dans un champ magnétique pour extraire les particules magnétiques. Les grains sont enfin triés en diamètre par passages successifs dans des tamis. Les capsules comportent de 3 000 à 50 000 grains de 0,3 à 0,4 mm de diamètre.

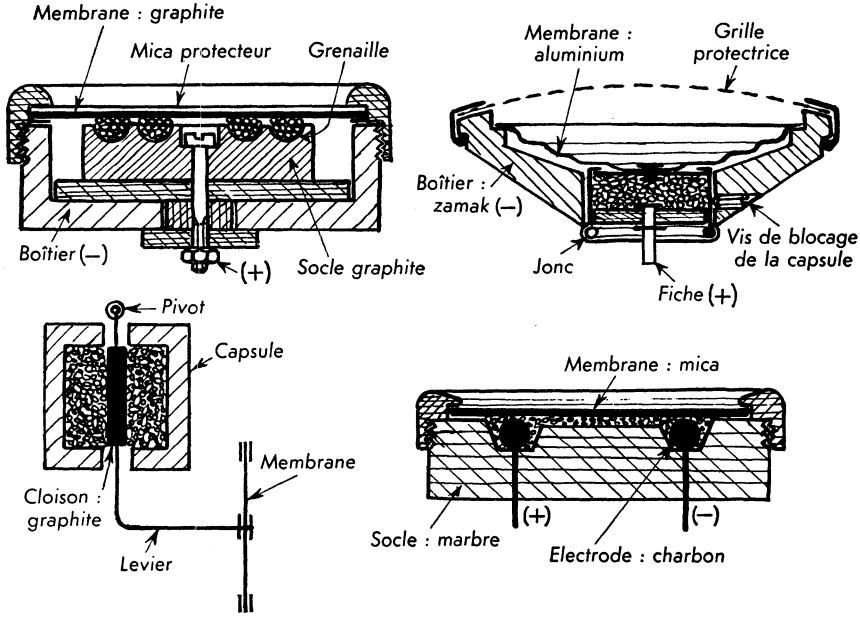


Fig. 5-12 à Fig. 5-15. — Modèles de microphones à charbon.

B - Différents modèles.

1° Microphone à grenaille simple (fig. 5-12).

Il est constitué suivant le principe ci-dessus, la membrane en graphite appuyant, sur des billes sphériques moulées en charbon végétal ou minéral. Ce sont surtout la forme et les caractéristiques physiques des granules qui déterminent la qualité des résultats obtenus. L'utilisation des grains de diamètres différents peut éviter une résonance néfaste dans la gamme des fréquences transmises.

2° Microphone à capsule (fig. 5-13).

Il a l'avantage sur le modèle précédent d'avoir la grenaille enfermée dans une capsule facilement amovible et interchangeable. L'emploi de grains très fins, multipliant les contacts, le rend particulièrement sensible.

Le diaphragme en aluminium, très léger (2 dcg), transmet les vibrations au point central à une rondelle de mica qui appuie sur la grenaille de la capsule.

Le diaphragme (épaisseur 0,007 mm) conique et rigide au centre possède des ondulations circulaires augmentant la souplesse et réduisant la résonnance propre.

3° Microphone à double effet (push-pull).

Il est constitué par deux capsules placées de part et d'autre de la membrane et opérant en opposition. On obtient un effet compensateur qui annule la production d'harmoniques pairs d'où suppression d'une partie des distorsions. La fidélité est augmentée au-delà de 5 000 Hz, mais l'efficacité est faible. Des dispositifs de commande indirecte permettent d'ailleurs d'augmenter cette dernière (fig. 5-14).

4° Microphone à courants transversaux.

Il est constitué par un socle en marbre inerte et creusé d'une cavité dans laquelle se trouve les granules de charbon étendues en couche mince. Les courants circulent transversalement entre deux électrodes parallèles dans les modèles parallélépipédiques (fig. 5-15) ou entre deux (ou plusieurs) électrodes concentriques dans les modèles circulaires. Cette disposition permet d'obtenir la suppression des résonances gênantes et une amélioration de la fidélité jusqu'à 10 000 Hz. Malgré une efficacité relativement élevée, ils sont remplacés par les microphones piézo-électriques.

C - Limites d'emploi.

1° Avantages.

Les microphones à charbon ont une bonne efficacité qui varie de — 45 dB à — 35 dB suivant les modèles. Ils ne nécessitent pas de préamplification et ils permettent d'obtenir une tension alternative de l'ordre de 0,1 volt (2 à 3 volts à la sortie d'un transformateur de 100 kΩ).

Ce sont des appareils robustes et peu coûteux.

2° Inconvénients.

Le plus grave est le bruit de fond toujours très irrégulier, simple crachement ou crépitement provoqué par différents phénomènes de nature physique, en particulier les étincelles éclatant entre les granules.

Ils sont peu fidèles. La figure 5-16 donne la caractéristique de réponse d'un microphone à grenaille. La fidélité peut être augmentée au détriment de l'efficacité en diminuant l'amplitude des vibrations de la membrane. Par

ailleurs nous avons vu des modèles spéciaux (microphones à double effet et à courants transversaux) qui ont une plus grande fidélité.

La plupart des modèles présentent une directivité assez nette aux fréquences élevées (fig. 5-17) qui provoque des **distorsions** modifiant **la** tonalité.

Ils nécessitent une source de courant auxiliaire et sont sensibles à l'humidité.

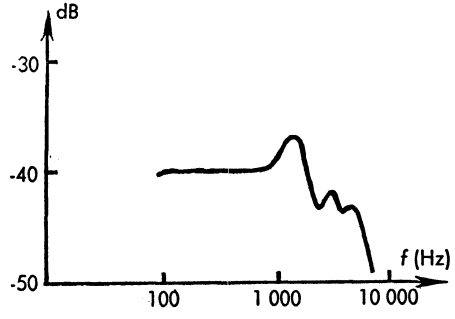


Fig. 5-16

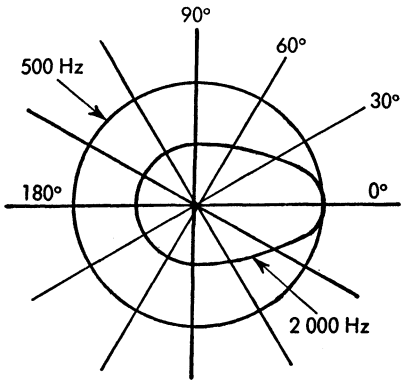


Fig. 5-17

Caractéristique de réponse et diagramme directionnel d'un microphone à charbon.

3° Utilisations.

Etant donné les inconvénients, les microphones à charbon ne sont utilisés que pour la transmission de la parole. L'utilisation principale est celle des microphones à capsule dans les combinés micro-écouteur en téléphonie.

Les microphones de bouche et laryngophones à charbon ont cédé la place aux microphones piézo-électriques plus fidèles.

Leur remarquable sensibilité trouve des applications comme relais microphoniques en prothèse auditive et télémécanique.

III. MICROPHONES PIÉZO-ÉLECTRIQUES.

A - Principe.

1° Piézo-électricité.

La piézo-électricité est un phénomène de polarisation provoqué dans certains cristaux par des contraintes mécaniques.

Le quartz, dont un cristal est représenté à la figure 5-18, a servi de base à l'étude de la piézo-électricité. Le cristal est un prisme rhomboédrique possédant un axe optique, trois axes électriques dirigés comme l'indique la figure. Les trois axes perpendiculaires aux faces s'appellent les axes mécaniques.

Si nous appliquons une force dF dirigée suivant l'axe électrique, nous obtenons une charge électrique dQ du cristal, la polarisation obtenue étant normale à l'axe optique. Et l'on a :

$$dQ = K \cdot dF.$$

Si la force est appliquée dans une direction perpendiculaire à l'axe électrique et à l'axe optique, la quantité d'électricité libérée est :

$$dQ = K \left(\frac{l}{e}\right) dF$$

l : longueur du cristal suivant l'axe mécanique;
e : épaisseur du cristal suivant l'axe électrique;
K : constante piézo-électrique.
Pour le quartz $K = -6{,}94 \times 10^{-8}$.

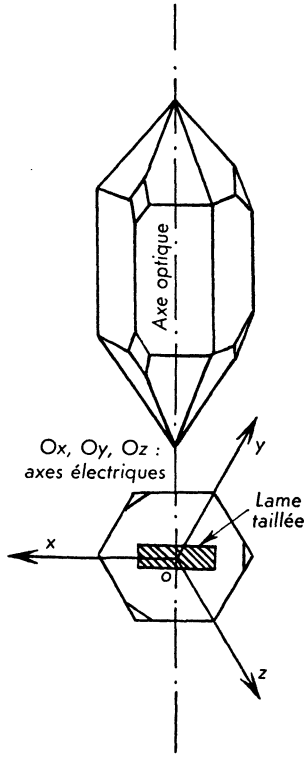


Fig. 5-18
Cristal de quartz.

Pour les applications électro-acoustiques, on n'emploie plus le quartz, mais le *sel de Seignette* (ou sel de La Rochelle) du nom des frères Seignette, pharmaciens à La Rochelle, qui le découvrirent. C'est un bitartrate double de sodium et de potassium hydraté qui est moins coûteux que le quartz et dont la constante piézo-électrique est mille fois plus grande environ :

$K = +\ 8\,000 \times 10^{-8}\ u \cdot e \cdot s.$
ou $K = +\ 2\,700 \times 10^{-12}$ coulomb/newton.

Plus récemment sont apparues des céramiques piézo-électriques à base de titanates (Tibalits).

$K = +\ 152 \times 10^{-12}$ coulomb/newton.

2° Fabrication du sel de Seignette.

Le tartre obtenu par décomposition des résidus de foulage du vin est un tartrate impur de potasse. Ce produit raffiné sous le nom de *crème de tartre*, est décomposé par un excédent de bicarbonate de soude et donne une solution de sel de Seignette.

Des germes cristallins sont obtenus par évaporation d'une solution à haute concentration. Puis dans une grande quantité de solution filtrée, on place les germes. Une évaporation lente de la solution maintenue entre 30 et 40 °C, pendant un à deux jours, permet la formation des cristaux.

Pour réduire au minimum la vitesse de cristallisation on dépose à la surface du liquide une couche d'huile de 1 à 2 mm d'épaisseur.

Les cristaux retirés de la solution sont trempés 12 h dans l'alcool à 90°, séchés rapidement et vernis à la gomme laque. La cristallisation est à six pans hexaédrique comme celle du quartz.

Les cristaux sont enfin taillés en lames rectangulaires, polies, rodées et vernies.

3° Eléments bimorphes.

Les lamelles utilisées sont associées par paires pour constituer des éléments bimorphes. L'avantage de cette disposition est de rendre l'élément moins sensible aux variations de température par suite des tensions mécaniques qui sont en opposition. Les électrodes sont des feuilles d'argent qui recueillent les charges sur chacune des faces (fig. 5-19).

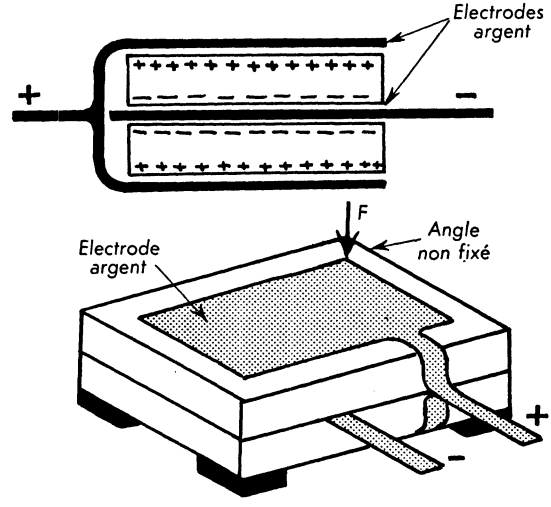


Fig. 5-19 et Fig. 5-20. — Eléments bimorphes piézo-électriques.

Les éléments bimorphes travaillent en torsion si l'effort est exercé sur les angles et en flexion si l'effort est exercé au milieu des côtés.

Dans le premier cas il se produit une double courbure de l'élément. La courbure le long d'une diagonale est convexe alors qu'elle est concave le long de l'autre.

Le sel de Seignette étant sensible à l'humidité, on protège les éléments en les recouvrant d'une feuille de papier ou de mica vernie.

L'élément est maintenu soit dans des pinces ou dans un support en Bakélite, soit en plusieurs points par collage (fig. 5-20) :

— épaisseur d'une lame : 0,15 mm environ;
— épaisseur totale : 0,5 mm environ;
— surface : 1 à 4 cm^2.

4° Fonctionnement.

La pression engendrée par les vibrations sonores déforme le cristal et la tension obtenue est proportionnelle à l'amplitude de la déformation.

Il existe des modèles dans lesquels l'action des ondes sonores s'exerce directement sur le cristal (fig. 5-21). Deux éléments bimorphes sont montés face à face, en laissant entre eux un espace d'air fermé.

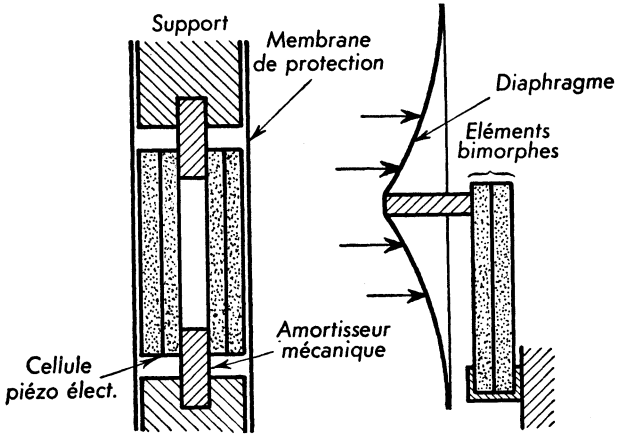


Fig. 5-21

Fig. 5-22

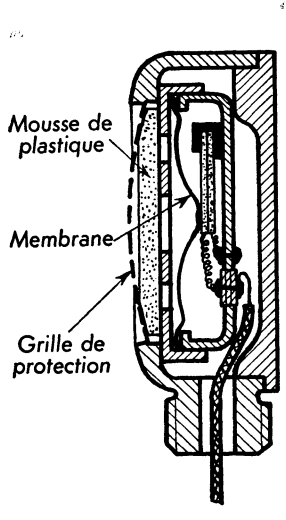


Fig. 5-23

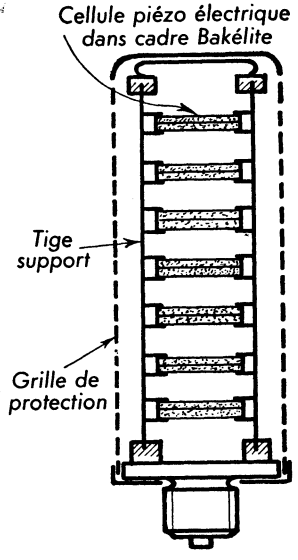


Fig. 5-24

Fig. 5-21 à 5-24. — Microphones piézo-électriques.

D'autres modèles comportent un diaphragme vibrant, dont les vibrations sont transmises à l'élément bimorphe (fig. 5-22).

B - Différents modèles.

1° Microphone à membrane (fig. 5-23).

La membrane en duralumin de forme conique incurvée, appuie en son sommet sur le cristal, soit sur un angle si celui-ci est fixé en trois points, soit au centre s'il est maintenu sur deux côtés. L'action au lieu d'être directe peut être transmise par l'intermédiaire d'un levier amplificateur. L'une des électrodes est reliée au boîtier en alliage léger, l'autre à un fil isolé, la sortie se fait ainsi par un fil coaxial.

2° Microphone à cellules multiples (fig. 5-24).

Le montage qui a été examiné à la fig. 5-21 constitue une cellule et l'on peut disposer plusieurs cellules les unes au-dessus des autres qui seront connectées en série-parallèle de façon à augmenter le niveau de sortie sans augmenter trop l'impédance.

Certains modèles sensibles peuvent comporter jusqu'à 6 groupes de 4 cellules reliées entre elles par des fils d'argent soudés à la base du support. L'ensemble est imprégné d'une cire spéciale qui les rend étanches.

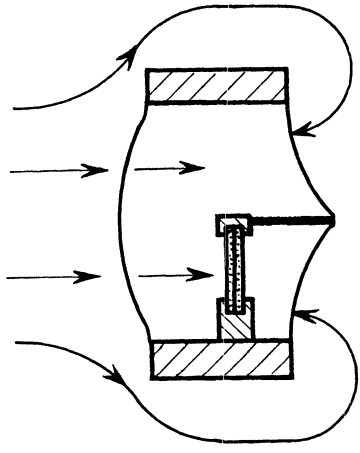


Fig. 5-25
Microphone à déphasage.

3° Microphone à déphasage (fig. 5-25).

Les deux modèles précédents ne présentent pratiquement aucun effet directif puisqu'étant des modèles à pression. Plusieurs marques américaines ont réalisé des microphones unidirectionnels, les propriétés directives reposant sur l'utilisation d'un dispositif de déphasage. Un microphone de ce type comporte deux membranes sensibles à la pression des ondes acoustiques.

La membrane active située sur l'avant du microphone agit sur le cristal alors que la membrane arrière n'est pas reliée. Le volume d'air et les dimensions du boîtier sont déterminés avec précision de façon qu'une onde arrière venant impressionner la membrane arrière se transmet à la membrane avant avec un certain retard par rapport à l'onde directe qui a contourné le microphone. Les pressions égales et de sens opposé s'annulent et la membrane avant ne bouge pas si les ondes proviennent de l'arrière. Lorsque l'onde provient de l'avant le déphasage est calculé de façon que l'onde ayant contourné le microphone s'additionne avec l'onde directe.

Ce type de microphone est insensible à l'effet Larsen (1) et aux bruits venant de l'arrière.

4° Autres modèles.

Les cristaux piézo-électriques sont beaucoup employés à cause de leur faible prix et de leur faible encombrement, comme microphones utilisant directement les vibrations mécaniques.

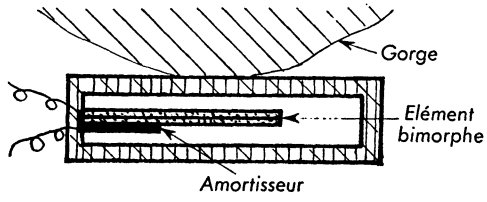


Fig. 5-26. — Laryngophone.

Les principaux modèles sont :

— Les *microphones à contact* appliqués directement sur les instruments de musique possédant une caisse de résonance (contrebasse, violoncelle, violon, guitare, etc.). L'enregistrement n'est plus sensible dans ce cas au bruit ambiant qui existe dans les salles publiques, ni à l'effet Larsen.

— *Les laryngophones* qui sont placés au contact de la gorge du parleur et fonctionnent sous l'effet des mouvements du larynx. La figure 5-26 montre le principe d'un laryngophone à cristal. L'élément bimorphe est enfermé dans un boîtier en Bakélite. La bande métallique formant amortisseur a pour but d'atténuer la pointe de résonance à 1 700 Hz.

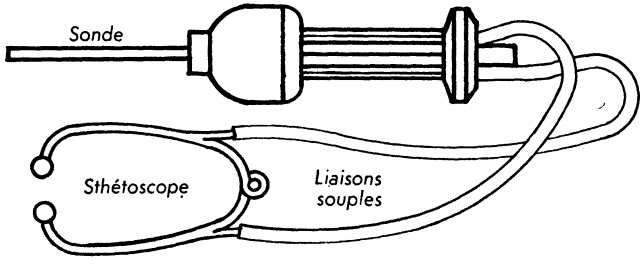


Fig. 5-27. — Sonde microphonique.

Ils sont employés dans les milieux bruyants tels que chantiers, ateliers de chaudronnerie, avions, etc.

(1) Effet Larsen : Accrochage (sifflement) provoqué lorsque le son capté par un microphone et émis par un H.P. vient frapper à nouveau le microphone. Il se produit si le H.P. est placé trop près du microphone.

— Les *sondes microphoniques* dont la figure 5-27 montre l'aspect extérieur d'un modèle à sthétoscope. D'autres modèles comportent un cornet acoustique pour l'écoute directe. Pour des mesures précises ils peuvent être reliés à un voltmètre électronique.

Tous ces appareils permettent de localiser les bruits ou vibrations mécaniques de toutes sortes : études en laboratoire, établissement d'un prototype, contrôle de série, surveillance de matériel, mouvement de fluides, etc.

C - Limites d'emploi.

1° Avantages.

Les microphones piézo-électriques sont des appareils légers, peu encombrants, robustes et peu coûteux. Ils ne nécessitent pas d'entretien. Leur efficacité est moyenne et varie beaucoup suivant les modèles (— 45 dB à — 75 dB).

Ce sont évidemment les modèles à cellules multiples qui sont les plus sensibles.

La tension obtenue va de 0,03 V dans 10 MΩ à 0,15 V dans 5 MΩ.

La fidélité est bonne et même excellente pour les microphones à cellules. Entre 6 000 Hz et 10 000 Hz, il y a une amplification supplémentaire qui a l'avantage d'éviter l'emploi d'un amplificateur compensé (fig. 5-28).

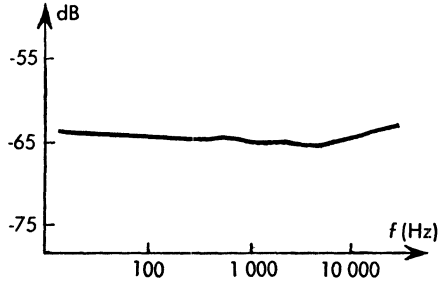


Fig. 5-28

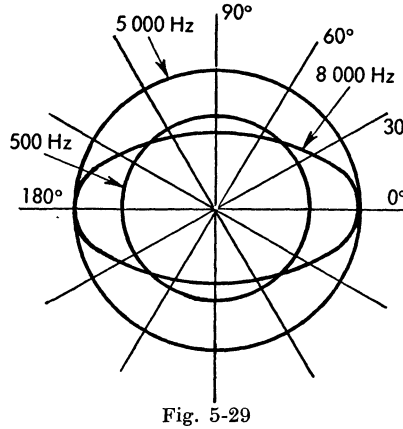


Fig. 5-29

Caractéristiques de réponse et diagramme de directivité d'un microphone piézo-électrique.

2° Inconvénients.

Ils sont en principe sensibles à l'humidité mais les constructeurs fabriquent des modèles étanches (boîtier en cuivre rouge cadmié et bichromaté, traitement intérieur d'étanchéité, membrane en aluminium pur).

Les microphones piézo-électriques ordinaires sont omnidirectionnels donc sensibles aux bruits venant de toutes les directions. La figure 5-29 montre qu'ils possèdent une légère directivité pour les fréquences élevées (8 000 Hz et plus). Nous avons vu qu'un système à déphasage permet d'obtenir des microphones directifs.

L'installation nécessite un ou deux préamplis, mais ils ne nécessitent aucune source auxiliaire.

Les cristaux forment un condensateur ayant une capacité de 3 000 à 5 000 pF.

3° Utilisations.

La faible efficacité des microphones à membrane exige une profondeur de champ restreinte. Ils sont utilisés plutôt pour la transmission de la parole.

Les microphones à cellules qui possèdent une efficacité beaucoup plus grande et une excellente fidélité, sont employés pour les diffusions de qualité, les discours, les conférences, l'enregistrement sur installations fixes ou mobiles étant donné leur robustesse.

La robustesse, la légèreté, la facilité d'emploi trouvent des applications comme microphones à contact, laryngophones, sondes microphoniques.

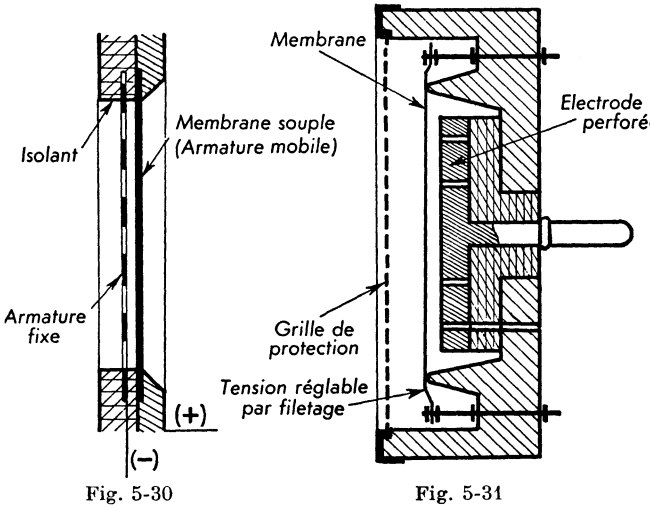


Fig. 5-30 Fig. 5-31

Microphones électrostatiques.

IV. MICROPHONES ÉLECTROSTATIQUES.

A - Principe.

1° Fonctionnement.

Le fonctionnement des microphones électrostatiques est basé sur les variations de capacité d'un condensateur en fonction des variations de vitesse ou de pression de l'onde acoustique.

Les microphones à vitesse, peu utilisés, possèdent une membrane très souple alors que les microphones à pression ont une armature mobile très tendue se déplaçant en regard d'une armature fixe épaisse (fig. 5-30).

Appliquons entre les armatures d'un condensateur une différence de potentiel continue constante U à travers une résistance R de valeur élevée. Les variations de pression acoustique en déplaçant la membrane mobile produisent des variations de la capacité C (300 à 500 pF) entraînant des variations du courant I traversant la résistance et en conséquence des variations de la tension U aux bornes de R. La tension produite est proportionnelle à la variation $\Delta C/C$ de la capacité ($U = E\,\Delta.C/C \sin \omega t$) à condition que R soit suffisamment élevée par rapport à l'impédance de la capacité tout en restant faible devant la résistance des isolants pour réduire les pertes au minimum.

Les variations de tensions produites sont faibles (quelques μV), d'où l'emploi d'un préamplificateur pour amener le niveau à une valeur utilisable pour l'attaque correcte d'un amplificateur.

Le diélectrique généralement utilisé est l'air (1).

2° Construction.

Les conditions nécessaires au bon fonctionnement sont les suivantes :

a) Pour éviter la production d'harmoniques, l'amplitude des mouvements de la membrane doit être faible par rapport à l'épaisseur du diélectrique qui doit être faible également.

L'épaisseur du diélectrique est de l'ordre du dixième de mm et l'amplitude des oscillations de la membrane de l'ordre d'une fraction de micron.

b) Pour obtenir une tension de sortie, indépendante de la fréquence, la variation de capacité doit être également indépendante de la fréquence. Pour cela on utilise un diaphragme mince très tendu, à la limite d'élasticité, ayant une fréquence propre au-delà de la gamme des fréquences auditives.

c) La sensiblité est d'autant plus grande que l'amplitude des oscillations de la membrane est plus grande pour une pression acoustique donnée. On a intérêt à utiliser une membrane légère ayant peu d'inertie, telle qu'une feuille de duralumin de 20 à 50 microns d'épaisseur.

La sensibilité est d'autre part d'autant plus grande que l'épaisseur du diélectrique est réduite mais on est limité dans cette voie, car une tension d'une centaine de volts étant appliquée entre les armatures exerce une force d'attraction statique qui s'ajoutant à la dilatation thermique de la membrane risque de provoquer un court-circuit des armatures.

B - Différents modèles.

1° Microphone électrostatique à pression (fig. 5-31).

La membrane en duralumin, très mince doit avoir un état de surface extrêmement soigné. Sa tension est réglable au moyen d'un anneau fileté.

(1) Certains modèles ont l'armature mobile constituée par une métallisation d'or ou d'argent sur une mince pellicule de polyester (Mylar).

Le parallélisme des armatures étant difficile à réaliser certains modèles ont l'armature fixe montée sur une rotule sphérique en quartz avec réglage permettant d'obtenir le parallélisme.

L'amortissement est réalisé par la lame d'air emprisonnée entre les deux armatures. L'élasticité de l'air ne doit pas être trop grande afin d'atténuer les résonances et d'accroître la sensibilité aux fréquences basses. A cet effet l'armature fixe est perforée ou creusée de sillons profonds. Pour éviter l'action des variations de la pression atmosphérique sur l'amortissement, la chambre à air communique avec l'atmosphère et pour éviter l'introduction de l'humidité la protection arrière est assurée par une membrane en soie formant filtre.

2° Microphone électrostatique à vitesse.

Un appareil américain de ce type comporte 8 rubans minces en aluminium de 0,05 mm d'épaisseur, placés librement devant l'armature fixe rigide. C'est un appareil à haute impédance très directif, ayant une sensibilité de — 50 dB.

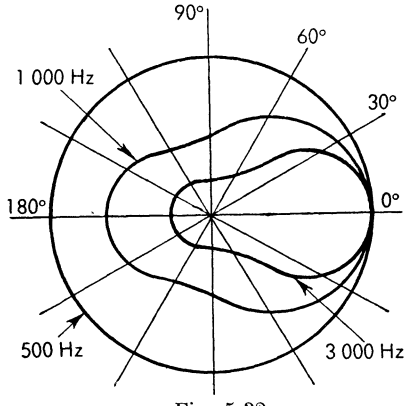


Fig. 5-32

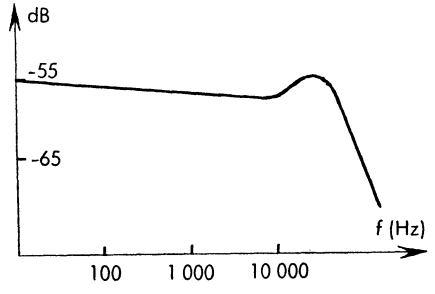


Fig. 5-33

Diagramme directionnel et caractéristique de réponse d'un microphone électrostatique.

C - Limites d'emploi.

1° Avantages.

Les microphones à condensateur sont des appareils fidèles de grande précision. La caractéristique de réponse (fig. 5-33) montre qu'il n'y a pas de coupure aux fréquences basses. La fidélité est remarquable jusqu'à 8 000 Hz. Les microphones de qualité sont omnidirectionnels pour toutes les fréquences. Néanmoins certains modèles présentent aux fréquences élevées des propriétés directives assez gênantes pour les sons aigus (fig. 5-32).

Par ailleurs ces microphones ne donnent pas de bruit de fond.

2° Inconvénients.

Ce sont des appareils de construction délicate donc coûteux. Ils sont peu sensibles (— 55 à — 90 dB). L'emploi d'un préamplificateur faisant bloc avec le microphone est indispensable afin d'obtenir une liaison très courte qui ne nuise pas à la transmission des fréquences élevées.

Ils nécessitent l'emploi d'une source auxiliaire (généralement batterie) fournissant une tension élevée de 200 à 300 V.

Ils sont très sensibles à l'action des agents atmosphériques (poussières, humidité) et l'on doit assurer un assèchement absolu avant leur mise en service et réaliser une protection ultérieure efficace.

3° Utilisations.

Ils sont presque exclusivement employés en studios et pour les transmissions de qualité.

Leur grande précision rend possible un étalonnage précis et constant permettant les mesures.

V. MICROPHONES ÉLECTRODYNAMIQUES.

A - Principe.

1° Fonctionnement (fig. 5-34).

Les microphones électrodynamiques comportent un conducteur qui se déplace sous l'action des ondes acoustiques dans un champ magnétique constant assez intense. Ce déplacement crée une force électromotrice dans le conducteur.

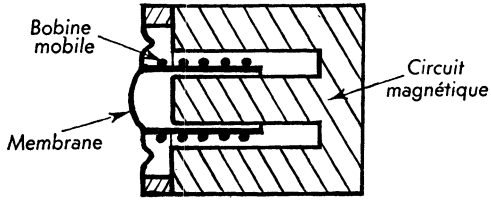


Fig. 5-34
Principe d'un microphone électrodynamique.

Le conducteur peut être une bobine légère (microphone à bobine mobile) ou un ruban (microphone à ruban),

Dans le cas d'une bobine mobile la valeur de la force électromotrice induite recueillie aux extrémités du conducteur est :

$$e = H \cdot l \cdot v. \qquad \text{(système } SI\text{)}$$

e : force électromotrice en volts (V).
H : champ magnétique en ampères par mètre (A/m).
v : vitesse linéaire de la bobine en mètres par seconde (m/s).
l : longueur du fil en mètres (m).

2° Construction.

La force électromotrice est donc proportionnelle à la vitesse de déplacement de la membrane qui doit être souple et légère de façon à pouvoir suivre facilement les vibrations acoustiques.

Pour augmenter e on peut évidemment agir sur la longueur du conducteur mais on est vite limité dans cette voie à cause de l'inertie.

Le facteur influant est donc le champ magnétique. La mise au point des matériaux modernes pour aimants (1) a permis l'obtention de forts champs magnétiques avec simplification de la construction par rapport aux électro-aimants à excitation qui sont maintenant complètement abandonnés.

En principe la différence de potentiel obtenue doit être proportionnelle à la force agissant sur la membrane, et indépendante de la fréquence. En fait l'excès de rigidité de la membrane aux fréquences basses, et l'excès d'inertie aux fréquences élevées doivent être corrigés.

Les microphones à bobine mobile sont à pression donc non directifs alors que les microphones à ruban sont à vitesse et bidirectifs.

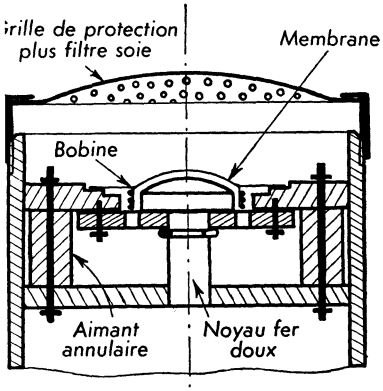


Fig. 5-35

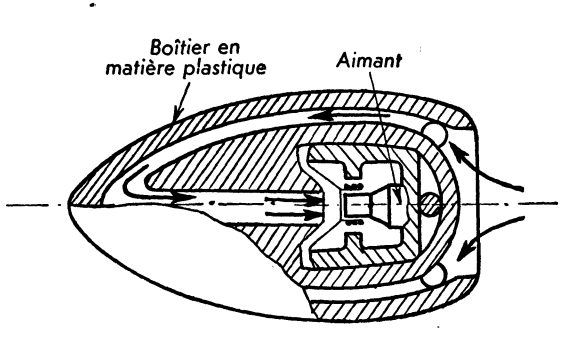


Fig. 5-36

Modèles de microphones électrodynamiques.

B - Différents modèles.

1° Microphone à bobine mobile (fig. 5-35).

La membrane souple et très légère (50 à 100 mg), en aluminium, est pincée ou collée sur son pourtour.

La bobine mobile très légère (20 à 100 mg) est réalisée en fil d'aluminium émaillé collé sur un mandrin léger en carton ou aluminium. Sur certains modèles le mandrin est supprimé et les spires jointives sont maintenues entre elles par un vernis synthétique.

(1) Voir tome I.

Les aimants annulaires sont en aciers à l'aluminium (Ticonal, Alnico) et créent un champ puissant dans un entrefer le plus réduit possible (moins d'un mm). Les pièces polaires sont en fer doux.

La bobine mobile comporte peu de spires et offre une impédance à 800 Hz de 30 à 50 Ω. Il faut prévoir un transformateur d'adaptation à l'entrée de l'amplificateur (rapport 1/100).

La compensation de l'effet d'inertie aux hautes fréquences peut être obtenue par une chambre de compensation ou une fente communiquant avec la chambre du diaphragme. L'air qui s'y trouve comprimé aux hautes fréquences, étant donné la durée très courte d'une vibration, augmente la rigidité de la membrane et compense en partie l'inertie.

La compensation de l'effet de rigidité aux basses fréquences est obtenue sur certains modèles par un tube réunissant la face avant du microphone à la chambre acoustique. Pour certaines dimensions du tube il est possible de créer une succion agissant sur l'arrière en même temps que la pression sur la face avant. L'effet augmentant lorsque la fréquence décroît permet de compenser la trop grande rigidité de la membrane.

L'ensemble est enfermé dans un boîtier comportant sur l'avant une grille de protection avec éventuellement une deuxième grille à mailles plus fines ou un filtre en soie.

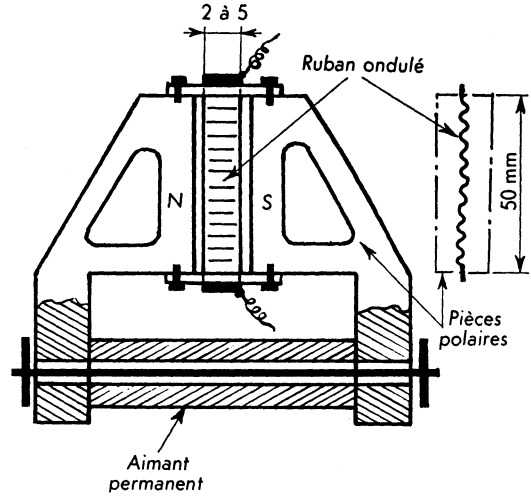


Fig. 37. — Microphone à ruban.

Le microphone à bobine mobile peut être rendu directif par l'adoption d'un boîtier en Bakélite de forme ovoïde, les ondes sonores parvenant à la membrane par un canal central (fig. 5-36). On obtient ainsi un renforcement des ondes sonores, et un effet directionnel assez sensible.

2° Microphone à ruban (fig. 5-37).

C'est par excellence le prototype du microphone à vitesse. Il est donc bidirectif. Le conducteur mobile est formé d'un ou plusieurs rubans, minces (quelques μ), très légers et libres sur leurs deux faces.

Le ruban est maintenu en haut et en bas par des pièces fixes et placé dans un entrefer étroit. Lorsqu'il se déplace sous l'action des ondes sonores, une force électromotrice prend naissance le long du ruban. Il apparaît aux extrémités une différence de potentiel proportionnelle à la vitesse de déplacement du ruban.

Le ruban est ondulé pour lui donner suffisamment de flexibilité. L'impédance du ruban est très faible (0,01 Ω) et la tension obtenue très faible également. Pour éviter les pertes en lignes, le transformateur élévateur de tension est normalement placé dans le boîtier de l'appareil (rapport 1/500). Le fil de liaison doit être court et gros pour éviter les pertes de tension.

Le microphone « Isophase » est un microphone dont le ruban replié est déposé sur un support plastique par la méthode des circuits imprimés. L'aimant en ferrite permet de placer le ruban en dehors des pièces polaires.

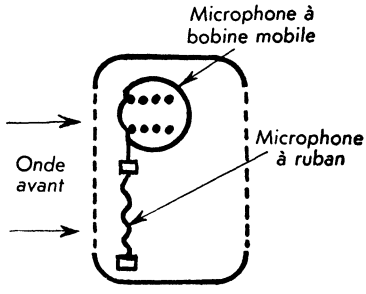


Fig. 5-38

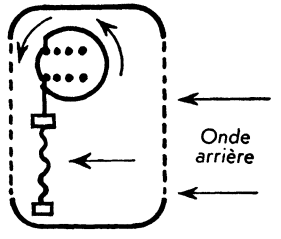


Fig. 5-39
Microphone multiple.

3° Microphone multiple (fig. 5-38 et 39).

La combinaison d'un microphone à pression et d'un microphone à vitesse permet d'obtenir des microphones sensibles seulement aux sons provenant de l'avant. Le diagramme directionnel obtenu est donné à la figure 5-44. Ils sont appelés encore microphones *cardioïde* du nom de la courbe théorique obtenue.

L'efficacité est double sur l'avant, faible sur les côtés et nulle à l'arrière. Pour les ondes provenant de l'arrière les déplacements des deux membranes sont en sens inverse et les tensions s'annulent.

Bien que les combinaisons de deux microphones à vitesse et pression soient nombreuses, les plus utilisées sont :

{ microphone à bobine mobile. / microphone à ruban à vitesse. } ou { microphone à ruban à pression (1). / microphone à ruban à vitesse. }

(1) Les microphones à ruban à pression ont la face arrière du ruban en communication avec une chambre de compression.

C - Limites d'emploi.

1° Avantages.

Les microphones à ruban sont des appareils très fidèles comme le montre la caractéristique de réponse de la figure 5-45. Ils reproduisent bien les

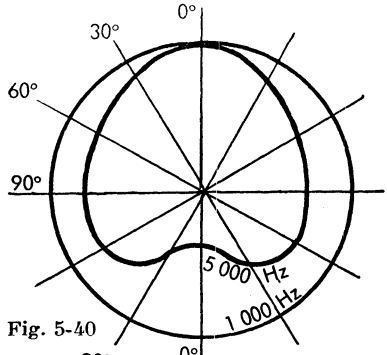


Fig. 5-40

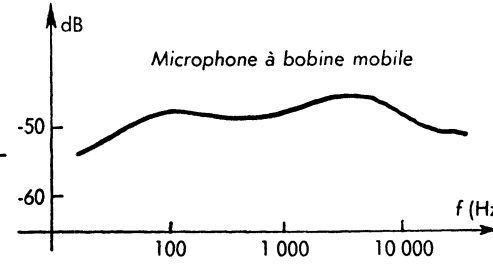


Fig. 5-41

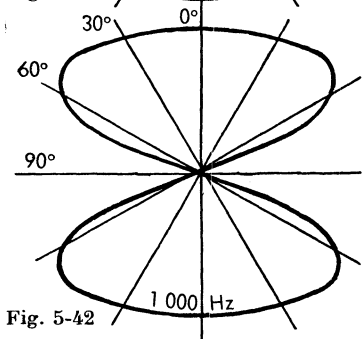


Fig. 5-42

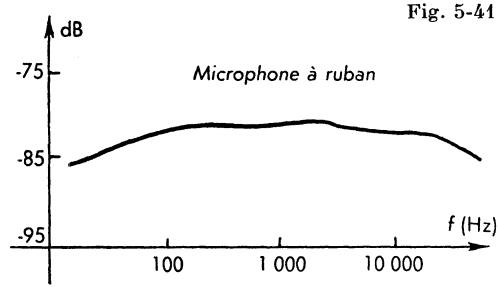


Fig. 5-43

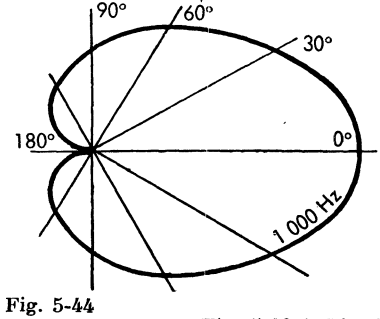


Fig. 5-44

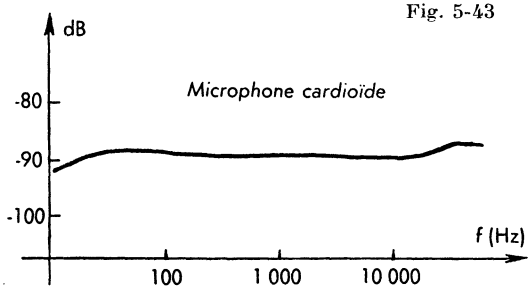


Fig. 5-45

Fig. 5-40 à Fig. 5-45. — Diagrammes directionnels et caractéristiques de réponse des microphones électrodynamiques.

transitoires. Par contre les microphones à bobine mobile présentent des distorsions possibles sur les aigus (fig. 5-41). Les microphones multiples permettent d'obtenir une excellente fidélité.

Du point de vue directivité les microphones électrodynamiques se prêtent à de nombreuses combinaisons.

Les microphones à bobine mobile sont omnidirectionnels (fig. 5-40) mais présentent néanmoins un effet directif sur les aigus. Les microphones à ruban à vitesse sont bidirectionnels (fig. 5-42) et les microphones multiples sont unidirectionnels (fig. 5-44) donc pratiquement insensibles à l'effet Larsen et aux bruits provenant de l'arrière.

Par ailleurs ces microphones sont robustes, peu sensibles aux chocs, aux agents atmosphériques et ne donnent pas de bruit de fond.

Ils ne nécessitent pas d'alimentation auxiliaire. La ligne à basse impédance peut être longue et avoir plusieurs centaines de mètres.

2° Inconvénients.

La sensibilité des microphones à bobine mobile est moyenne (— 50 à — 60 dB) et ils nécessitent un préamplificateur. Celle des microphones à ruban est faible (— 60 à — 80 dB) et il faut un préamplificateur à deux étages.

Ils sont sensibles au vent qui donne un bruissement désagréable donc peu recommandé à l'extérieur (surtout microphones à ruban).

3° Utilisations.

Surtout pour la transmission en intérieur des chants, orchestres, discours, scènes de théâtre.

Les microphones à ruban sont particulièrement recommandés pour la transmission et l'enregistrement de musique. Par contre l'inertie du ruban étant très faible, ils doivent être assez éloignés de la source sonore (2 m au moins) ce qui réduit l'efficacité.

Les microphones cardioïde permettent des sonorisations de haute qualité.

Citons encore l'utilisation des microphones électrodynamiques à ruban en milieu bruyant (usines, mines, foires...) car ils sont insensibles aux bruits ambiants. Dans ce cas ils doivent être placés près de la bouche.

VI. INSTALLATION DES MICROPHONES.

A - Fixation.

Les procédés utilisés sont extrêmement nombreux suivant le genre d'utilisation.

Microphone à main : figure 5-49.
Combiné téléphonique : figure 5-46.
Microphone sur pied de sol : figure 5-47.
Microphone sur pied de bureau : figure 5-48.
Microphone à contact, laryngophone : figure 5-51.

Microphone suspendu : figure 5-50.
Microphone sur perche (cinéma) : figure 5-52.
Microphone dissimulé.

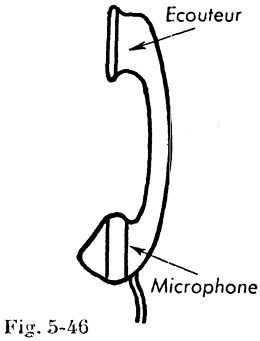


Fig. 5-46

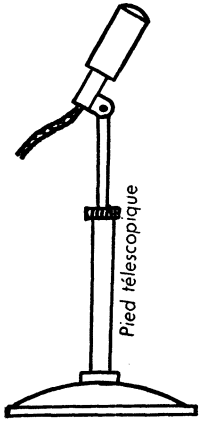


Fig. 5-47

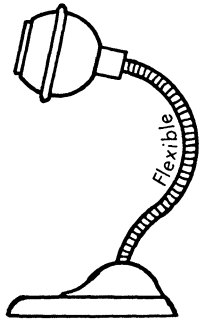


Fig. 5-48

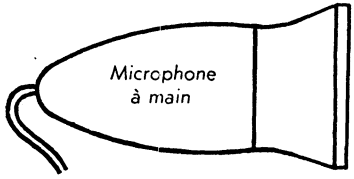


Fig. 5-49

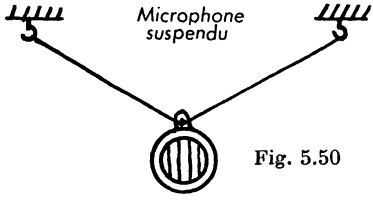


Fig. 5.50

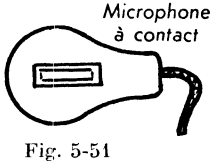


Fig. 5-51

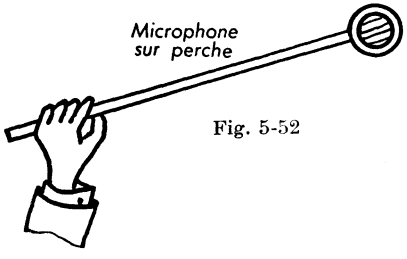


Fig. 5-52

B - Disposition.

Elle est très variable suivant l'utilisation, la sonorisation musicale étant celle qui nécessite l'observation de règles essentielles, si l'on veut obtenir de la qualité. L'étude de la disposition dépasse le cadre de ce cours de technologie et nous ne citerons que les trois principes nécessaires à l'obtention de bons résultats.

1° Choisir un modèle de microphone correspondant au genre de sonorisation (direct, disque, magnétophone, cinéma) et au milieu ambiant (plein air, église, théâtre, studio).

	Modèles	Fidélité	Efficacité	Directivité	Z à 1000 Hz	U de sortie	Nombre de préamplis	Alimentation	Divers	Utilisations
A CHARBON	à grenaille à capsule	Médiocre	bonne – 35 à – 45 dB	directif pour aigus	200 Ω	0,1 à 1 V	0 ou 1	6 V	Bruit de fond Robustes Peu coûteux Sensibles à l'humidité	Téléphonie Usages d'amateurs Relais
PIÉZO-ÉLECTRIQUES	à membrane à cellules à déphasage	très bonne	moyenne – 45 à – 75 dB	omnidirectif directif pour micro à déphasage	50 à 100 kΩ	20 à 50 mV	1 ou 2	aucune	Robustes Insensibles au vent Sensibles à l'humidité Légers	**A membrane :** parole et chant plein air fixe ou sur véhicule **A cellules :** diffusion et enregistrement de qualité parole ou musique
ÉLECTROSTATIQUES	à pression à vitesse	excellente	faible – 55 à – 90 dB	micro à pression : omnidirectifs micro à vitesse : très directif	500 kΩ	5 mV	1 ou 2 (rapprochés)	200 à 300 V	Pas de bruit de fond Coûteux Sensibles aux agents atmosphériques	En studios et transmission de qualité surtout musique Mesures
ÉLECTRODYNAMIQUES	à bobine	moyenne	moyenne – 50 à – 60 dB	directif pour aigus	40 Ω	40 mV	1	aucune	Pas de bruit de fond Robustes Sensibles au vent Modèles directifs insensibles à l'effet Larsen	Intérieur **A bobine :** chant, orchestre, discours, théâtre **A ruban :** Musique **Multiple :** Haute fidélité Elimination des bruits arrière
	à ruban	très bonne	faible – 60 à – 80 dB	bidirectif	0,01 Ω	10 à 20 mV				
	multiple	excellente	faible – 60 à – 80 dB	unidirectif						

2° Tenir compte de l'acoustique architecturale (absorption acoustique, réverbération, échos, réflexions). En particulier l'installation en studios d'enregistrement doit être particulièrement soignée à ce point de vue.

3° Le nombre et la position des microphones dépend de la nature des sons (speaker, acteurs, soliste, orchestre). Lorsque les sons proviennent d'une source éloignée (certaines prises de sons cinématographiques, détections sonores) on utilise un microphone à réflecteur parabolique destiné à améliorer l'efficacité et la directivité.

Remarque : Certains microphones comportent un interrupteur incorporé ou un commutateur à plusieurs sensibilités.

CHAPITRE 6

LES HAUT-PARLEURS ET ÉCOUTEURS

I. GÉNÉRALITÉS.

A - Définitions.

Récepteur électro-acoustique : Transducteur électro-acoustique qui transforme les ondes électriques en ondes acoustiques

Haut-parleur : Transducteur électro-acoustique conçu pour rayonner dans l'espace de la puissance acoustique, à partir d'ondes électriques.

Ecouteur : Récepteur électro-acoustique destiné à être couplé acoustiquement à l'oreille.

Récepteur téléphonique : Ecouteur utilisé dans un poste téléphonique.

Ecouteur interne : Ecouteur à embout, de petites dimensions, que l'on introduit à l'intérieur du conduit auditif.

Pavillon acoustique : Tube de section variable ayant des surfaces terminales d'aires différentes, pour réaliser une adaptation d'impédance acoustique et éventuellement, créer un effet de directivité.

Ecran acoustique ou baffle : Dispositif rigide sur lequel est fixé un haut-parleur et destiné à augmenter le trajet acoustique effectif entre la face avant et la face arrière du haut-parleur.

B - Représentation schématique.

Les symboles représentés aux figures 6-1 à 6-9 sont tirés de la norme NF C 03-390.

C - Caractéristiques.

1° Efficacité (ou sensibilité).

C'est l'aptitude d'un haut-parleur à donner des sons d'intensité relativement élevée pour une puissance modulée relativement faible.

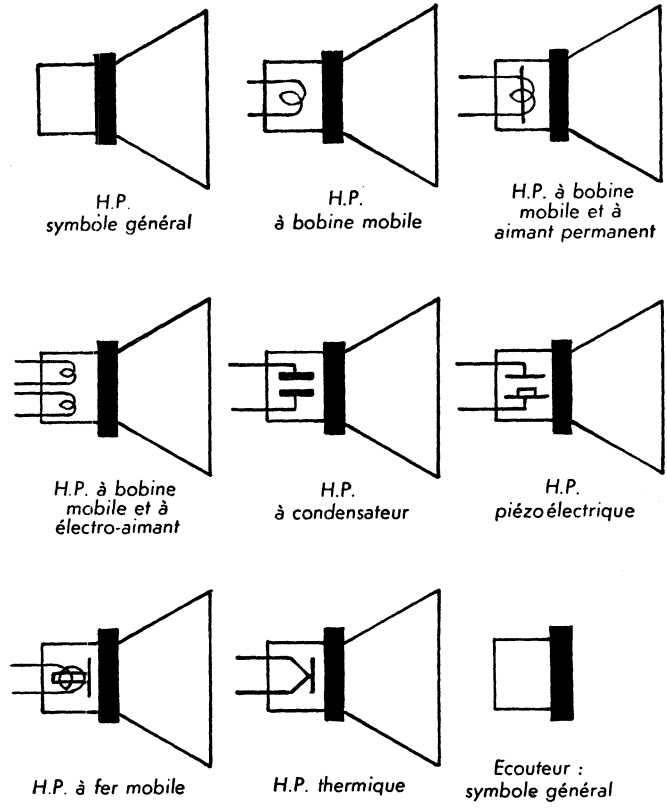


Fig. 6-1 à Fig. 6-9. — Symboles des haut-parleurs.

2° Fidélité.

C'est l'aptitude d'un haut-parleur (ou écouteur) à reproduire sans introduire de distorsion toutes les fréquences audibles.

Cette qualité est mise en évidence au moyen de la caractéristique de réponse.

3° Puissance modulée (ou nominale).

C'est la puissance électrique maximale que peut supporter un haut-parleur à 400 Hz.

4° Rendement.

C'est le rapport de la puissance acoustique émise et de la puissance électrique fournie. On doit préciser pour quelle fréquence il a été mesuré.

5° Impédance de la bobine mobile.

Sa valeur est mesurée à 400 Hz.

6° Champ dans l'entrefer.

Comme $\mu = 1$ pour l'air, il est égal à l'induction de l'aimant utilisé et peut être exprimé en Wb/m^2 ou teslas.

7° Directivité.

Les propriétés directives sont mises en évidence au moyen d'un diagramme directionnel.

8° Autres caractéristiques.

Ce sont les caractéristiques dimensionnelles (en particulier le diamètre), le poids, la protection climatique.

D - Classification.

1° Du point de vue fonctionnel.

a) Haut-parleur électrodynamique (ou à conducteur mobile).

Haut-parleur dans lequel un conducteur, parcouru par un courant variable, oscille dans un champ magnétique constant.

— Le *haut-parleur à bobine mobile* est un haut-parleur électrodynamique dans lequel le conducteur mobile est une bobine.

— Le *haut-parleur à aimant permanent* est un haut-parleur électrodynamique dans lequel le champ magnétique est produit par un aimant permanent.

— Le *haut-parleur à électro-aimant* (ou à excitation extérieure) est un haut-parleur électrodynamique dans lequel le champ magnétique est produit par un électro-aimant.

b) Haut-parleur électrostatique (ou à condensateur).

Haut-parleur dont le principe de fonctionnement repose sur l'action mécanique de forces électrostatiques sur les armatures d'un condensateur.

c) Haut-parleur électromagnétique.

Haut-parleur dont le principe de fonctionnement repose sur les variations d'induction électromagnétique.

d) Haut-parleur piézo-électrique.

Haut-parleur dont le principe de fonctionnement repose sur les propriétés piézo-électriques de certains corps.

e) Haut-parleurs spéciaux.

Bien que les haut-parleurs précédents soient pratiquement les seuls à être utilisés, il existe d'autres types ayant fait l'objet d'applications particulières.

— *Le haut-parleur à armature magnétique* dont le principe de fonctionnement repose sur l'action des forces d'attraction magnétique sur une armature ferromagnétique.

— Le *haut-parleur à magnétostriction* dont le principe de fonctionnement repose sur les propriétés magnétostrictives de certains corps.

— Le *haut-parleur ionique* (ou ionophone) dont le principe de fonctionnement repose sur les variations d'impédance d'un volume d'air ionisé.

— le *haut-parleur pneumatique* dont le principe de fonctionnement repose sur la modulation d'un écoulement gazeux.

Remarque : Les définitions données pour les différents types de haut-parleurs sont directement transposables au cas des écouteurs.

2° Du point de vue acoustique.

a) Haut-parleur à rayonnement.

Haut-parleur dont l'élément rayonnant agit directement sur l'air sans adaptation d'impédance.

b) Haut-parleur à pavillon.

Haut-parleur dans lequel l'élément rayonnant est couplé au milieu ambiant au moyen d'un pavillon

c) Haut-parleur multi-cellulaire.

Haut-parleur à pavillon dans lequel l'élément rayonnant est couplé au milieu ambiant au moyen de deux ou plusieurs pavillons accolés.

d) Haut-parleur à voies multiples.

Système de deux ou plusieurs haut-parleurs généralement combinés avec des réseaux séparateurs et qui sont conçus pour transmettre efficacement une bande de fréquences déterminée.

e) Ecouteur.

Récepteur électro-acoustique destiné à être couplé acoustiquement à l'oreille.

f) Ecouteur interne.

Écouteur à embout, de petites dimensions, que l'on introduit à l'intérieur du conduit auditif.

g) Vibrateur (ou récepteur pour conduction osseuse).

Transducteur électromécanique qui transmet au système osseux, par contact et sans intermédiaire aérien, des vibrations mécaniques à partir d'oscillations électriques.

II. HAUT-PARLEUR ÉLECTROMAGNÉTIQUE.

A - Principe (fig. 6-10).

Le système est constitué par un aimant permanent, une palette en fer doux articulée à l'extrémité de laquelle se trouve une tige actionnant la membrane. Une bobine parcourue par le courant variable, entoure la palette. Au repos la palette est équilibrée dans le champ magnétique. En fonctionnement, les variations d'induction électromagnétique créées par la bobine font pivoter la palette autour de son axe de part et d'autre de sa position d'équilibre.

Les oscillations électriques sont ainsi transformées en oscillations mécaniques puis en vibrations acoustiques par la membrane.

B - Limites d'emploi.

1° Inconvénients.

Du fait du faible entrefer nécessaire à une bonne sensibilité, les mouvements de grande amplitude sont impossibles d'où impossibilité de reproduire les fréquences basses ($f < 120$ Hz).

L'amplitude des déplacements n'est pas proportionnelle à l'intensité du courant qui circule dans la bobine.

2° Utilisations.

Bien que le type de haut-parleur électromagnétique décrit ci-dessus soit une amélioration des premiers haut-parleurs, la reproduction des sons est affectée de distorsions et de résonances métalliques qui l'ont fait complètement abandonner au profit des haut-parleurs électrodynamiques.

III. HAUT-PARLEUR ÉLECTRODYNAMIQUE.

A - Principe (fig. 6-13).

1° Description.

Il est constitué par :

— Une *culasse* formant le circuit magnétique et comportant soit un aimant permanent, soit un électro-aimant.

— Une *bobine mobile* pouvant osciller dans l'entrefer.

— Une *membrane* (ou cône) solidaire de la bobine mobile qui transforme les oscillations mécaniques en vibrations acoustiques.

— Un *spider* ou bague de centrage qui doit, sans gêner le mouvement, maintenir la bobine mobile au centre de l'entrefer.

— Une *suspension* souple reliant la membrane au bâti du haut-parleur.

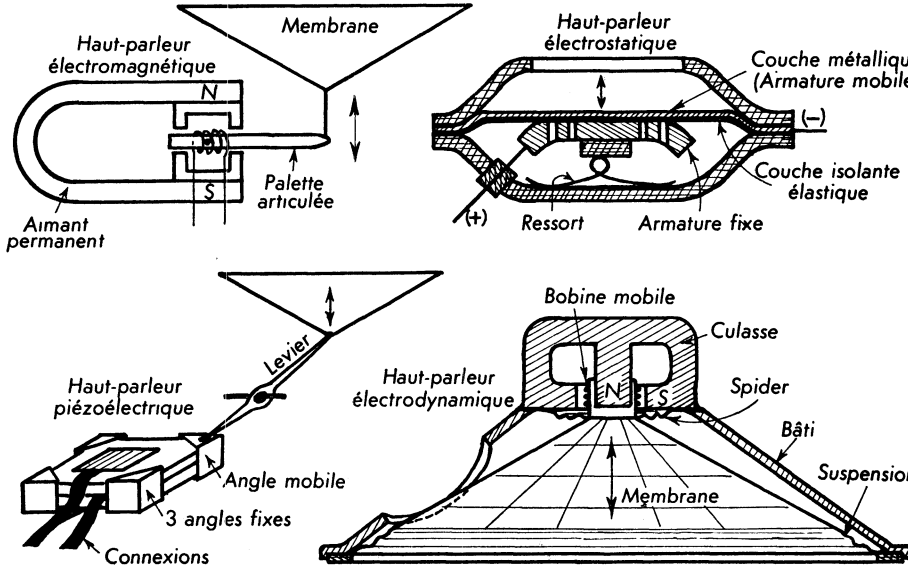


Fig. 6-10 à Fig. 6-13. — Différents types de haut-parleurs.

2° Fonctionnement.

La bobine étant parcourue par un courant i la force F qui la sollicite a pour valeur d'après la loi de Laplace :

$$F = H \cdot n \cdot l \cdot i$$

F : Force parallèle à l'axe de la bobine en newtons (N).
H : champ créé par l'aimant dans l'entrefer en ampères par mètre (A/m).
n : nombre de spires de la bobine.
l : longueur d'une spire en mètres (m).
i : intensité parcourant la bobine en ampères (A).

Si le courant est de la forme $i = I \sin \omega t$, la force lui est proportionnelle et aura même fréquence à condition que la bobine se déplace dans un *champ constant*.

L'efficacité du haut-parleur sera d'autant plus grande que, pour un courant i donné, la force sera plus grande. Bien que l'on puisse agir sur n et l, on est vite limité à cause de l'inertie du système mobile et c'est la valeur du champ H qui offre le plus d'intérêt.

La valeur élevée de l'induction obtenue avec les aimants modernes a permis d'augmenter l'efficacité et d'amener l'abandon progressif des haut-parleurs à excitation extérieure.

B - Limites d'emploi.

L'étendue du spectre reproduit (40 Hz à 10 000 Hz pour un H.P. de qualité), la qualité de reproduction, alliées à un prix de revient réduit, ont consacré la supériorité de ce dispositif sur tous les autres.

IV. HAUT-PARLEUR PIÉZO-ÉLECTRIQUE.

A - Principe (fig. 6-12).

Le haut-parleur piézo-électrique utilise la propriété inverse de celle qui a été décrite pour les microphones piézo-électriques. Lorsqu'on soumet les deux faces d'un cristal à une force électromotrice alternative, il se dilate et se contracte à la même fréquence. Les vibrations mécaniques obtenues sont transmises à la membrane par l'intermédiaire d'un levier amplificateur.

Les cristaux utilisés sont des éléments bimorphes en sel de Seignette (revoir paragraphe III du chapitre 5).

B - Limites d'emploi.

1° Avantages.

Ces haut-parleurs ont une très grande efficacité et conviennent pour la reproduction des fréquences élevées supérieures à 5 000 Hz.

2° Inconvénients.

La caractéristique de réponse est peu régulière. La reproduction des graves est impossible car ils nécessitent des déplacements trop grands qui provoqueraient la rupture du cristal. La puissance acoustique fournie est assez faible car les amplitudes de vibrations du cristal sont faibles.

3° Utilisations.

Les haut-parleurs piézo-électriques sont employés comme haut-parleurs d'aiguës (tweeter) dans les installations à plusieurs haut-parleurs ou comme haut-parleurs d'oreiller.

V. HAUT-PARLEUR ÉLECTROSTATIQUE.

A - Principe (fig. 6-11).

1° Fonctionnement.

Ce type de haut-parleur est basé sur le principe suivant : Si on applique entre les armatures d'un condensateur une tension alternative, elles s'attirent plus ou moins suivant la valeur des forces électrostatisques dues à la présence des charges sur les armatures. L'une des armatures étant fixe, l'autre se déplace à la même fréquence que celle de la tension appliquée.

La force d'attraction n'est pas proportionnelle à la tension appliquée, mais au carré de cette tension. Pour diminuer la distorsion d'amplitude qui en résulterait, on superpose à la tension alternative une tension continue au moins dix fois plus grande (250 à 300 V) pour que le taux de distorsion reste inférieur à 5 %.

2° Description.

Il est constitué d'une armature fixe perforée pour diminuer la distorsion et d'une armature mobile constituée par une fine couche d'or ou d'argent de quelques microns d'épaisseur métallisée sur le diélectrique. Celui-ci doit être élastique pour permettre les déformations (par exemple du rilsan ou du polystyrène de 25 microns d'épaisseur environ). La présence du diélectrique plastique évite tout court-circuit qui pourrait se produire par suite de la présence de poussières ou de surcharge du haut-parleur. C'est un H.P. à rayonnement direct.

Un ressort tient la membrane métallisée toujours bien tendue.

Les tensions continue et alternative sont appliquées à l'armature fixe. L'armature mobile et le boîtier sont reliés à la masse.

B - Limites d'emploi.

1° Inconvénients.

La reproduction des graves qui nécessite de trop fortes amplitudes n'est pas possible à cause de l'écartement des armatures qui doit être faible pour avoir une efficacité suffisante.

Ces haut-parleurs sont sensibles à la température et à l'humidité.

2° Avantages.

Bonne reproduction des fréquences élevées avec de faibles distorsions.

3° Utilisations.

Les haut-parleurs électrostatiques sont employés comme les précédents comme reproducteurs d'aiguës (tweeter) dans les installations à plusieurs haut-parleurs.

VI. ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS (H.P. électrodynamiques).

A - Circuit magnétique.

1° Electro-aimant.

a) Forme.

Le circuit magnétique en fer doux est constitué par un noyau central supportant la bobine d'excitation, d'une plaque de champ destinée à concentrer le champ magnétique dans l'entrefer et d'une culasse en deux éléments tournés (fig. 6-14) ou en un seul embouti (fig. 6-15).

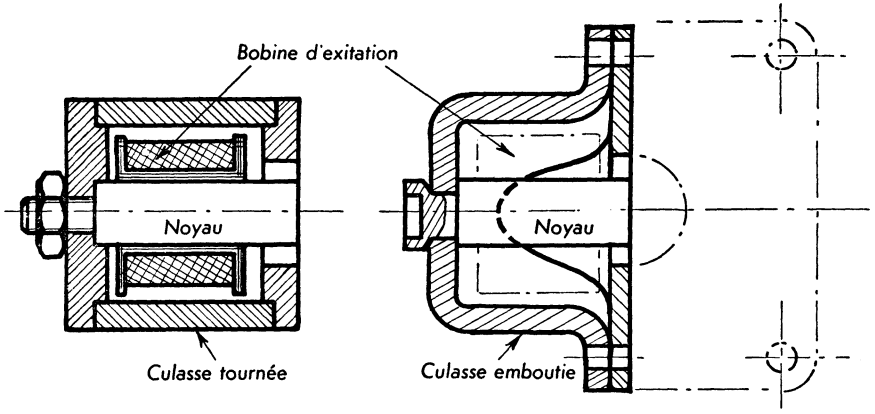


Fig. 6-14 et Fig. 6-15. — Circuits magnétiques de haut-parleurs à excitation.

Le fil de cuivre émaillé de diamètre 1,5 à 2 centièmes bobiné en vrac, qui constitue le bobinage d'excitation, est monté sur une carcasse à joues en press-pahn.

b) Inconvénients.

— Puissance supplémentaire nécessaire pour l'excitation : 4 à 40 W.

— Dégagement de chaleur nécessitant des ouvertures d'aération dans la culasse.

— Branchement électrique supplémentaire par rapport aux modèles à aimant permanent.

— Poids et encombrement importants.

— La bobine d'excitation alimentée en parallèle sur la haute tension (récepteurs tous courants) ou en série en l'utilisant comme bobine de filtrage (récepteurs alternatifs) est parcourue par la composante alternative du secteur qui provoque des ronflements.

Ces ronflements peuvent être supprimés au moyen d'une bobine de compensation en série avec la bobine mobile. Elle est constituée par quelques

spires en couplage serré avec l'enroulement d'excitation. Le sens de branchement est tel que les tensions induites dans ces quelques spires sont en opposition avec celles qui prennent naissance dans la bobine mobile.

Ce procédé est une complication supplémentaire et il a l'inconvénient d'augmenter l'impédance de la bobine mobile aux fréquences élevées et d'augmenter les pertes.

Un autre procédé consiste à placer un anneau de cuivre rouge à proximité de la bobine d'excitation. Les courants induits dans l'anneau créent un champ en opposition avec le champ parasite de ronflement. Ce procédé diminue l'inductance de l'enroulement (efficacité du filtrage diminuée).

2° Aimant permanent.

Les inconvénients des haut-parleurs à électro-aimant et la possibilité d'obtenir des champs intenses avec les aimants modernes ont consacré la supériorité des haut-parleurs à aimant permanent qui sont universellement adoptés actuellement.

a) Matériaux.

La plupart des aimants utilisés actuellement sont du type Ticonal ou Alcomax à champ orienté par traitement thermique spécial (voir chapitre III tome 1) qui permettent d'obtenir des énergies 10 à 15 % supérieures dans la direction du champ. Cette technique a permis de réduire ainsi les dimensions des aimants et des autres pièces.

Les valeurs d'induction obtenues vont de 0,8 à 1,4 T (8 000 à 14 000 G). Elles dépendent du poids de l'aimant et du diamètre du noyau.

Le produit (B.H.) max va de 13 500 à 40 000 J/m^3 suivant les matériaux. Ce produit correspond à l'énergie maximale qui peut être obtenue.

Des matériaux récents permettent encore de dépasser ces chiffres.

Ces aimants sont obtenus par moulage, travaillés à la meule et leur fragilité impose des formes simples.

— Certains haut-parleurs ont un aimant en ferrite dur (telle que la Vectolite ou le Caslox) (voir chapitre V tome 1) obtenu par frittage d'oxydes de fer et de cobalt. Bien que le produit (B.H.) max soit inférieur à celui des matériaux précédents (4 000 J/m^3) leur champ coercitif est très grand, le flux de fuites faible et ils permettent d'obtenir des haut-parleurs extra-plats et légers (fig. 6-19).

b) Assemblage.

Le procédé utilisé doit éviter l'introduction à force de pièces dans les aimants car ils pourraient se fissurer :

— Fig. 6-17. L'aimant est un anneau aimanté suivant son axe et fixé entre deux pièces polaires en fer doux. Le rendement, défini comme le rapport du flux dans l'entrefer au flux total, est de 40 % environ.

— Fig. 6-16. L'aimant est un tronc de cône central surmonté d'une pièce polaire en fer doux. La culasse en fer doux est emboutie. Le rendement maximum est dans ce cas voisin de 55 %.

— Fig. 6-18. L'aimant est un cyclindre central sans pièce polaire rapportée. Il est centré par une cuvette emboutie soudée sur la plaque polaire et sa fixation est obtenue par simple attraction magnétique sur la culasse.

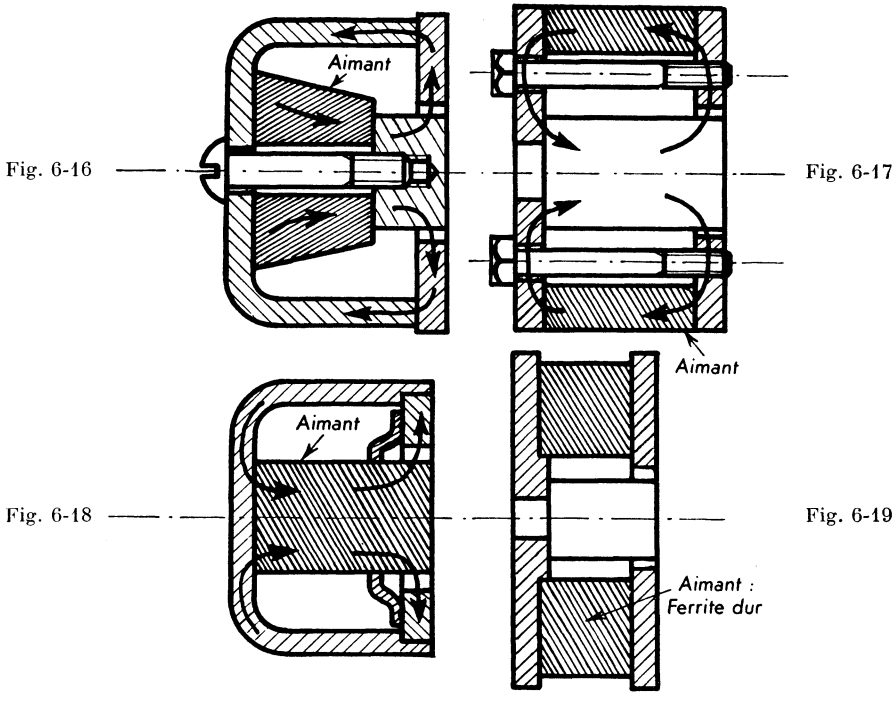


Fig. 6-16 à Fig. 6-19. — Circuits magnétiques de haut-parleurs à aimant permanent.

Le Ticonal ou l'Alcomax est aimanté de telle façon que les lignes de forces dans le cylindre soient parallèles à l'axe mais deviennent perpendiculaires au voisinage de l'entrefer. Le rendement atteint 65 %. Les pièces polaires sont cadmiées.

B - Bobine mobile.

1° Fonctionnement.

Nous avons vu que la force qui crée le déplacement est proportionnelle au nombre de tours et à la longueur du fil de la bobine mobile. Pour augmenter la sensibilité électrique on a intérêt à augmenter ces deux facteurs mais on est limité dans cette voie car la masse en mouvement devient trop grande et le rendement mécanique est mauvais aux fréquences élevées.

Pour un haut-parleur devant reproduire une large bande de fréquence la bobine doit donc être très légère. La masse de la bobine et de son support

est d'environ 0,8 g. Un haut-parleur conçu pour reproduire les graves seulement pourra avoir un moteur de quelques grammes.

Pour ne pas créer de distorsion d'amplitude, la bobine doit toujours couper un flux magnétique constant même dans ses positions limites (1). Deux solutions peuvent être utilisées :

— La bobine est fortement allongée (fig. 6-20) et sort du champ des deux côtés.

Cette solution peu utilisée, a l'inconvénient d'une inertie trop grande, préjudiciable à la reproduction des aiguës. D'autre part les spires extrêmes n'intervenant pas dans le fonctionnement provoquent des pertes en raison de leur résistance.

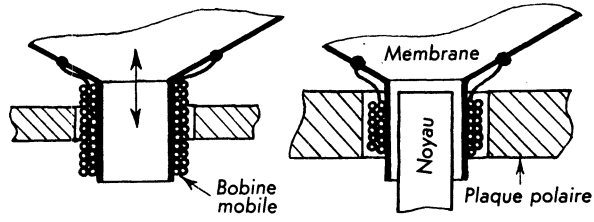


Fig. 6-20 et Fig. 6-21. — Bobines mobiles.

— L'autre solution (fig. 6-21) consiste à donner une longueur plus grande à l'entrefer et une longueur plus faible à la bobine de façon qu'elle couple toujours dans ses déplacements un flux constant. Cette méthode n'affecte pas la reproduction des aiguës ni le rendement, mais requiert un plus gros aimant donc plus coûteux.

2° Construction.

a) Le fil de section circulaire (2).

Il est en cuivre ou mieux en aluminium plus léger.

Le fil émaillé est bobiné à spires jointives généralement en deux couches, de façon à ce que les extrémités sortent du même côté pour être fixées sur le cône où seront soudés les fils provenant du transformateur d'adaptation.

(1) Le déplacement pour une même puissance est inversement proportionnel au carré de la fréquence.

(2) Dans des haut-parleurs de haute qualité certains constructeurs emploient un conducteur à section carrée permettant d'augmenter le volume de la bobine sans augmentation de l'entrefer. D'autres constructeurs utilisent une bobine en 2 parties séparées par un élément souple. Pour les sons graves les deux parties se déplacent en totalité. Pour les sons aigus la partie la plus grande de la bobine est shuntée par un condensateur et seule la partie la plus petite se déplace en entraînant la membrane.

Chiffres pour un haut-parleur ordinaire :

— diamètre du fil : 0,18 mm;
— longueur du fil : 4,5 m;
— diamètre de la bobine : 25 mm;
— nombre de spires : 60 en deux couches.

Les impédances de la bobine sont 2,5 - 4 - 8 - 16 - 25 — 50 Ω à 400 Hz.

b) Le support.

C'est un cylindre de papier mince imprégné d'un vernis formo-phénolique ou cellulosique afin d'augmenter sa rigidité. La bobine une fois montée est imprégnée d'une colle cellulosique pour éviter toute possibilité de déplacement des spires.

La bobine est enroulée sans support sur les haut-parleurs d'aigus.

Les spires sont simplement maintenues entre elles par une résine synthétique.

C - Membrane ou cône.

Le cône est la partie la plus délicate du haut-parleur. Il se prête peu au calcul et sa conception nécessite beaucoup d'expérience pratique. La puissance sonore, la bande de fréquence reproduite, la pureté des sons dépendent de ses dimensions, de sa forme, de sa texture et de ses ondulations.

1° Dimensions.

Le diamètre de la membrane doit être d'autant plus grand que l'on veut reproduire des fréquences plus basses.

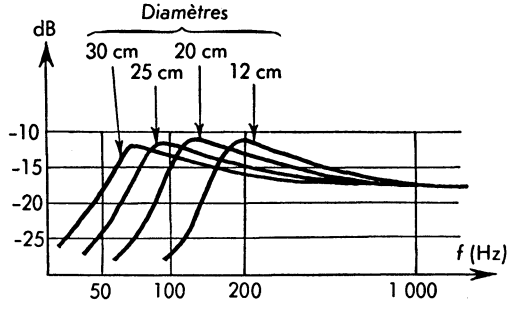


Fig. 6-22. — Influence du diamètre des cônes de haut-parleurs.

Nous verrons que la reproduction des fréquences musicales les plus basses nécessite l'adoption d'un baffle ou d'un pavillon. Les courbes de la figure 6-22 montrent les limites auxquelles on peut prétendre pour différents diamètres de haut-parleurs équipés d'un même aimant.

Aux fréquences élevées les vibrations sont limitées à la région centrale du cône et ceci d'autant plus que la fréquence est plus grande.

2° Nature.

La membrane doit être légère et rigide agissant ainsi comme un piston sur l'air sur une bande étendue de fréquences.

a) Les membranes des haut-parleurs ordinaires sont en papier spécial embouti à chaud en une pièce à partir d'une rondelle de pâte à papier. Un vernis d'imprégration les rend imperméables et hydrofuges (vernis cellulosique, vinylique ou silicone). Les transitoires sont mieux rendus avec des membranes rigides.

Pour améliorer la reproduction des aiguës le sommet du cône subit une imprégnation supplémentaire de vernis Bakélite augmentant la rigidité.

b) La membrane des haut-parleurs d'aiguës (tweeter) est en duralumin, plus rigide que le papier et diminuant les distorsions harmoniques.

c) Pour les membranes de haut-parleurs d'interphones on utilise du Nylon ou du Rilsan siliconé afin de favoriser les fréquences de la parole. Ces haut-parleurs sont réversibles et jouent aussi le rôle de microphones.

3° Ondulations (ou corrugations) fig. 6-23.

Les ondulations à la base du cône ont pour but d'assouplir la suspension. Leur raideur détermine pour une large part la fréquence de résonance principale du haut-parleur. Cette fréquence peut être amortie en amincissant le bord de la membrane (1).

Les nervures intermédiaires augmentent la flexibilité en certains points et facilitent la vibration partielle améliorant ainsi la reproduction des aiguës.

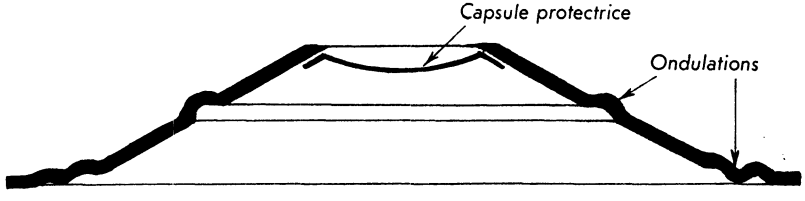


Fig. 6-23. — Membrane de haut-parleur.

4° Forme.

a) Forme conique.

C'est la plus courante. Elle donne des membranes légères et rigides. Pour les grands diamètres elle est incurvée.

Le sommet est obturé par une rondelle de papier évitant l'introduction de poussières dans l'entrefer (fig. 6-24).

(1) La souplesse ne doit pas être trop grande néanmoins car il y a génération de sous-harmoniques.

Pour atténuer la pointe de résonance aux fréquences basses, certains modèles possèdent un cône prolongé en pointe avec évidement correspondant dans le noyau (1) (fig. 6-25).

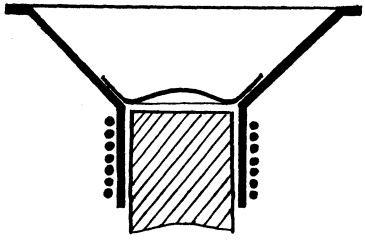


Fig. 6-24

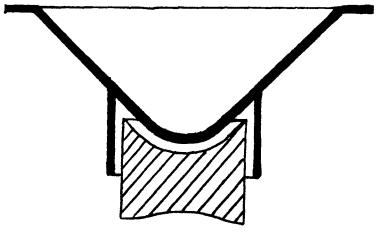


Fig. 6-25

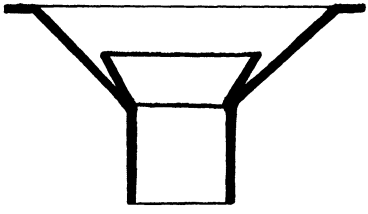


Fig. 6-26

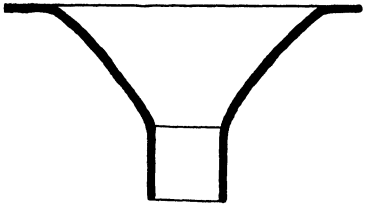


Fig. 6-27

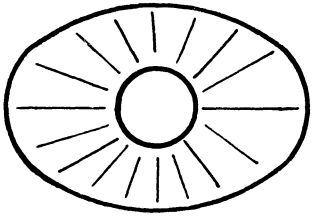


Fig. 6-28

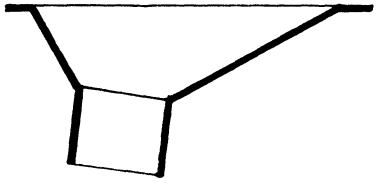


Fig. 6.29

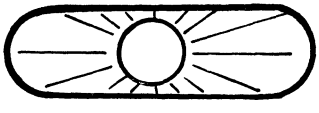


Fig. 6-30

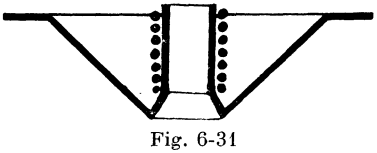


Fig. 6-31

Fig. 6-24 à Fig. 6-31. — Formes des membranes de haut-parleurs

Certains modèles de grand diamètre possèdent un petit cône léger en papier dur ou en duralumin à bord libre, fixé à la bobine mobile et destiné à favoriser la reproduction des aiguës (fig. 6-26).

(1) Une autre méthode atténuant la pointe de résonance consiste à tendre autour du haut-parleur une housse en toile.

b) Forme exponentielle (fig. 6-27).

Elle est peu utilisée car si elle semble améliorer la réponse dans l'aigu, elle donne une directivité accusée. Certains constructeurs fabriquent des membranes en deux parties. Le sommet de forme exponentielle est réuni par une couronne souple à la base de forme conique. La bobine mobile est fractionnée en deux parties. Pour les sons aigus, seul une partie de la bobine se déplace en entraînant le sommet de la membrane, l'autre partie de la bobine mobile étant shuntée par un condensateur. Pour les sons graves tout l'ensemble bobine et membrane se déplace.

c) Forme elliptique (fig. 6-28).

Elle permet une réduction de l'encombrement lorsque la place disponible est limitée.

Le rendement dans les graves est inférieur. Un haut-parleur elliptique doit être monté avec son grand axe vertical de façon à avoir une meilleure répartition des aiguës dans le plan horizontal.

Certains constructeurs fabriquent des modèles oblongs plus allongés que les précédents et spécialement étudiés lorsque la place est très limitée (électrophones, téléviseurs, mais au détriment de la bande de fréquences reproduites (fig. 6-30).

d) Forme coquille (fig. 6-29).

Elle est utilisée sur des haut-parleurs elliptiques à moteur excentré et permet une orientation oblique des sons (haut-parleurs de côté sur téléviseurs).

e) Cône inversé (fig. 6-31).

Cette disposition permet d'obtenir des modèles extra-plats utilisés sur postes portatifs ou sur électrophones. La disposition de l'aimant permet de réduire les fuites magnétiques.

Pour des haut-parleurs de mêmes caractéristiques et ayant 12 cm de diamètre on obtient les épaisseurs suivantes :

Normal, aimant Ticonal : 61 mm
Inversé, aimant Ticonal : 35 mm
Inversé, aimant ferrite : 26 mm

5° Suspension.

a) Par ondulations (fig. 6-32).

C'est la solution généralement adoptée. La souplesse est réalisée par amincissement du bord ou par enduit spécial des ondulations ou en traitant différemment à la fabrication le cône proprement dit et les ondulations.

Le haut-parleur est fixé à l'ébénisterie par l'intermédiaire d'une rondelle de feutre ou de liège amortissant les vibrations.

b) Par couronne souple (fig. 6-33).

Elle est réalisée au moyen d'une bande de peau. Ce fut celle des premiers haut-parleurs mais certains constructeurs la réutilisent avec une bande souple en mousse de polyuréthane.

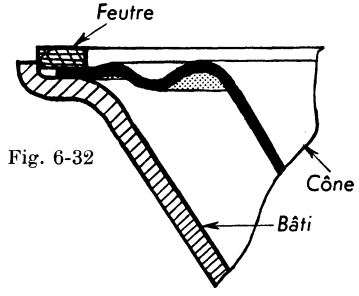


Fig. 6-32

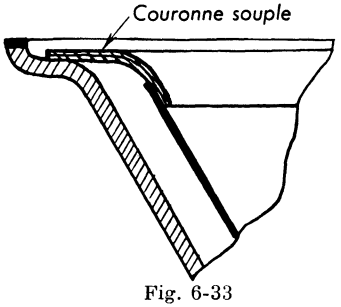


Fig. 6-33

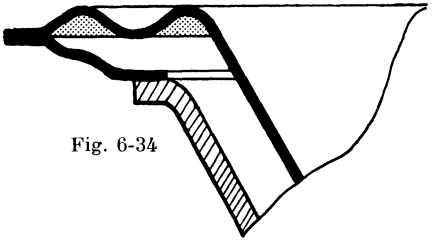


Fig. 6-34

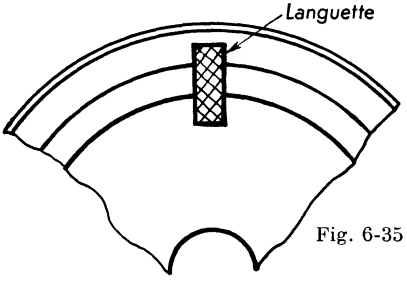


Fig. 6-35

Fig. 6-32 à Fig. 6-35. — Différents modèles de suspension des cônes de haut-parleurs.

c) Par suspension double (fig. 6-34).

Elle est très souple mais de construction délicate et la fixation du haut-parleur est plus compliquée (haut-parleurs à bords en accordéon R.C.A.).

d) Par languettes (fig. 6-35).

Les bords du cône sont libres et le centrage est assuré par 3 languettes de tissu bakélisé collées au châssis.

D - Spider.

1° Principe.

Le jeu latéral entre bobine mobile et pièces polaires doit être faible (0,1 à 0,25 mm) et nécessite donc un centrage précis. C'est le spider qui doit permettre de l'obtenir sans toutefois gêner les mouvements de la bobine mobile. Il ne doit pas opposer de résistance mécanique au déplacement, ce qui introduirait de la distorsion d'amplitude et ne doit pas avoir de résonance

propre. Il doit être léger et indéformable sous l'action de la chaleur et de l'humidité. La réponse aux transitoires est d'autant meilleure que la suspension est plus souple. Par contre la rigidité latérale doit être grande.

Fig. 6-36

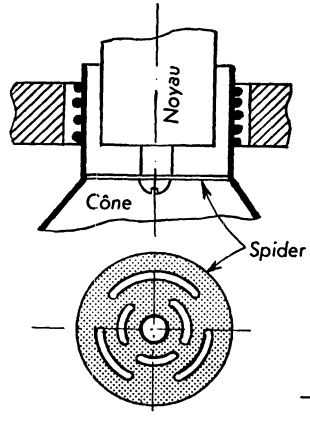
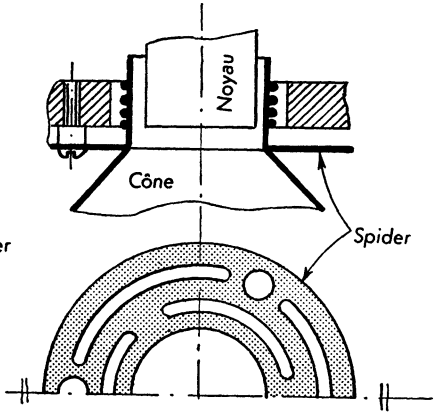


Fig. 6-37



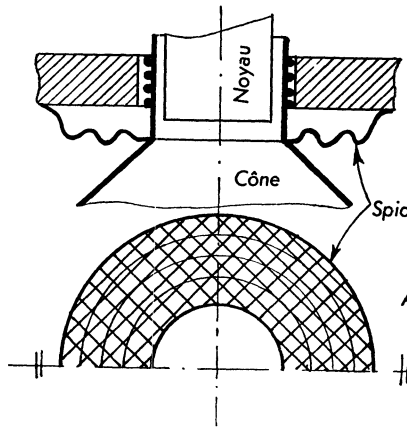


Fig. 6-38

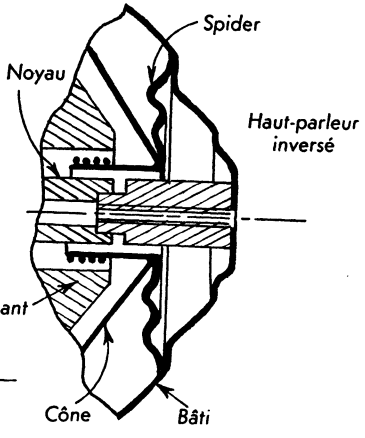


Fig. 6-39

Fig. 6-36 à Fig. 6-39. — Différents modèles de spiders.

2° Suspension.

a) Suspension avant (fig. 6-36).

Elle fut utilisée sur les premiers haut-parleurs. Le spider en carton bakélisé est fixé au centre sur le noyau et possède des ouvertures permettant d'augmenter la flexibilité. Les avantages de la suspension arrière cités ci-après ont fait abandonner cette solution.

b) Suspension arrière.

— Elle assure un meilleur centrage de la bobine mobile.
— La reproduction des aiguës est meilleure.
— La flexibilité est meilleure rendant ainsi les mouvements de grande amplitude plus faciles.

Le spider peut être soit une plaquette en toile bakélisée évidée, fixée en 3 points par vis (fig. 6-37) soit un disque de papier gaufré collé. Un perfectionnement de cette dernière solution consiste à utiliser un disque de tissu de coton bakélisé et gaufré qui donne une grande flexibilité, des résonances moins accusées et empêche l'introduction de poussières dans l'entrefer (fig. 6-38 et 6-39).

Sur les tous petits diamètres le spider est supprimé.

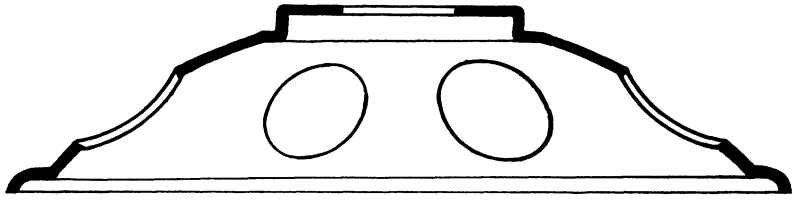


Fig. 6-40. — Bâti de haut-parleur.

E - Bâti (berceau, saladier).

Le bâti (fig. 6-40) métallique reçoit la culasse fixée par vis, maintient la base de la membrane et comporte les trous de fixation du haut-parleur. Il est protégé contre la rouille par une peinture ou un vernis.

Il doit être très rigide de façon à ce que le centrage de la bobine mobile soit constant. Généralement il est en tôle d'acier emboutie, évidée pour l'alléger. Ce procédé peu coûteux se prête facilement à la fabrication en grande série mais l'épaisseur de la tôle doit être suffisante et le serrage des vis de fixation ne doit pas être exagéré afin d'éviter les déformations.

Certains haut-parleurs de haute qualité ont un châssis moulé en alliage léger, usiné avec précision et donnant une rigidité plus grande. Par contre ils sont onéreux et plus fragiles.

VII. DISPOSITIFS ACOUSTIQUES.

A - Ecran acoustique ou « baffle ».

1° Principe.

Lorsque la membrane se déplace vers l'avant (fig. 6-41) il se produit une compression de l'air sur la face avant du cône et une dépression sur la face arrière. Une partie de l'air comprimé à l'avant contourne le cône et vient combler une partie de la dépression arrière. Il s'ensuit un affaiblissement important des fréquences basses pour lesquelles le trajet avant-arrière est court.

L'écran rigide sur lequel est fixé le haut-parleur (fig. 6-42) a pour but d'augmenter le trajet acoustique entre face avant et face arrière du haut-parleur.

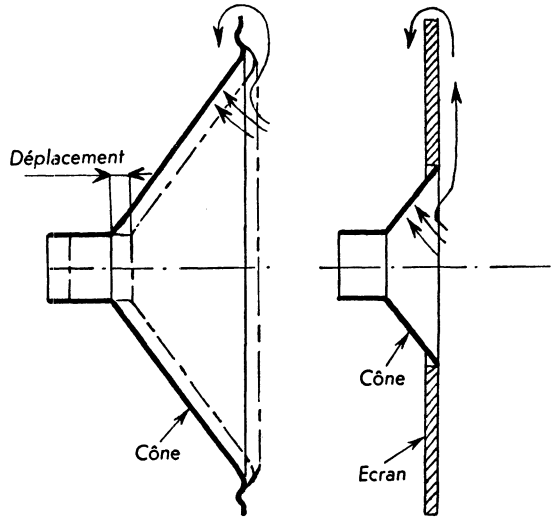


Fig. 6-41 et 6-42. — Rôle de l'écran.

La longueur d'onde sonore étant d'autant plus grande que la fréquence est plus basse, pour être efficace un baffle devra être d'autant plus grand que la fréquence minimale à reproduire sera plus basse. En pratique on admet que le diamètre d'un baffle circulaire doit être égal au moins à la demi-longueur d'onde la plus grande à reproduire.

Par exemple si $f = 34$ Hz est la fréquence minimale, $v = 340$ m/s étant la vitesse du son, on a :

$$\lambda = v/f = 340/34 = 10 \text{ m.}$$

Le diamètre de l'écran devra être égal ou supérieur à 5 m.

Le baffle plan de grandes dimensions n'étant pas toujours possible, l'emploi de meubles de formes diverses et de labyrinthes acoustiques permet d'obtenir des effets équivalents.

Lorsque le diamètre du baffle est égal à un nombre impair de demi-longueurs d'onde il y a renforcement de l'onde émise, par contre il y a atténuation de l'onde si le diamètre est égal à un nombre pair de demi-longueurs d'onde. Pour répartir ces effets tout le long de la bande des fréquences basses à reproduire on donne à l'écran une forme irrégulière de préférence, offrant ainsi aux diverses ondes des chemins de différentes longueurs.

Pour des fréquences supérieures à 1 000 Hz l'influence du baffle est négligeable.

2° Différentes formes.

a) Baffle infini.

L'écran acoustique idéal est le baffle de dimensions infinies. Pratiquement impossible à réaliser ; le haut-parleur encastré dans une cloison ou un mur tend à s'en rapprocher. Les figures 6-43 et 6-44 montrent deux dispositions donnant une reproduction sensiblement identique dans deux pièces contiguës. La première méthode étant adoptée pour des cloisons d'épaisseur inférieure à 7 cm, la seconde pour des cloisons plus épaisses.

b) Baffle plan.

Nous avons vu que les formes asymétriques sont les meilleures. La forme idéale à ce point de vue est celle de la figure 6-45 pour laquelle la longueur R varie dans le rapport 1 à 2, ce qui empêche de favoriser certaines fréquences. La solution de la figure 6-46 est moins bonne mais plus simple à réaliser.

Fig. 6-43 Fig. 6-44 Fig. 6-45 Fig. 6-46

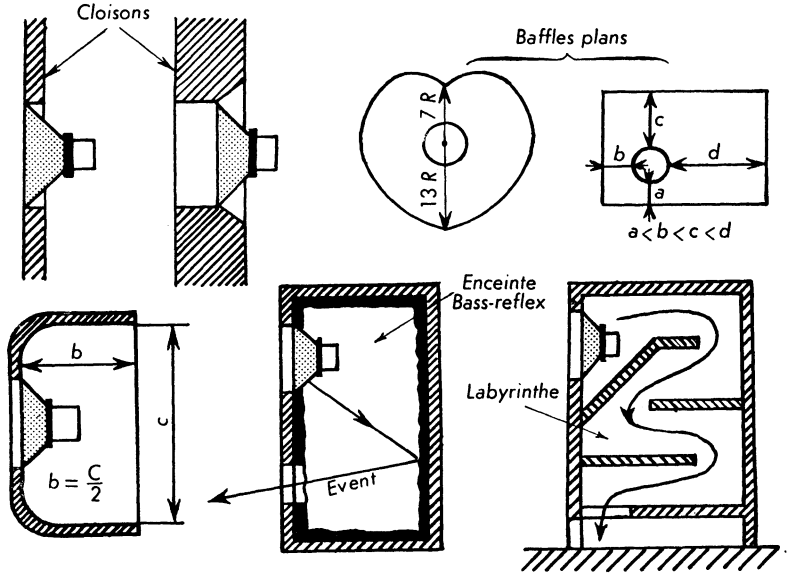


Fig. 6-47 Fig. 6-48 Fig. 6-49

Fig. 6-43 à Fig. 6-49. — Différents modèles de baffles.

c) Meuble ouvert à l'arrière (1) (fig. 6-47).

Il peut être assimilé à un baffle plan replié afin de diminuer l'encombrement. Pour éviter la résonance de la masse d'air à l'intérieur du meuble (bruit de

(1) Le meuble fermé à l'arrière ou pseudo-baffle infini impose des pressions excessives sur le cône et augmente sa fréquence de résonance. L'aération est mauvaise et il est déconseillé sauf s'il est de très grandes dimensions.

tonneau désagréable) la profondeur b doit être égale à la moitié de la plus grande des deux dimensions de la face avant.

d) Meuble réflex ou à inversion de phase (Bass-reflex).

C'est un meuble fermé à l'arrière et possédant une ouverture (ou évent) à l'avant (fig. 6-48).

Il existe pour un type donné de haut-parleur, des dimensions d'enceinte minimales et une surface d'ouverture optimale. La résonance de l'évent doit être inférieure à 60 Hz pour éviter des effets de persistance sonore.

Pour les fréquences basses le rayonnement de l'évent rectangulaire, dû à l'onde arrière, devient en phase avec l'onde avant.

Les avantages sont les suivants :

— augmentation de l'efficacité de rayonnement pour les fréquences basses;

— élimination des résonances acoustiques des baffles ordinaires ;

— diminution des distorsions non linéaires.

La cavité peut être accordée par un volet fermant plus ou moins l'évent. Les parois internes sont recouvertes de feutre ou de mousse de cellulose (épaisseur 2,5 cm) absorbant les ondes réfléchies aux fréquences élevées, supprimant ainsi certains phénomènes d'ondes stationnaires gênants.

e) Labyrinthe acoustique.

Il a pour effet d'allonger le chemin parcouru par l'onde arrière (fig. 6-49). Les parois internes sont recouvertes comme pour le meuble réflex de feutre ou d'Isorel mou. La longueur de la ligne de transmission est calculée pour qu'aux fréquences basses, l'onde arrière se trouve en phase avec l'onde avant, renforçant ainsi le rayonnement. Par exemple pour 60 Hz la longueur doit être de 1,35 m.

B - Pavillon.

1° Principe.

L'action du pavillon consiste à augmenter la résistance de rayonnement de la membrane ce qui permet de la charger plus efficacement. Le pavillon ne fournit pas d'énergie supplémentaire, mais constitue un adapteur d'impédance acoustique entre la membrane et l'air libre permettant ainsi d'augmenter le rendement.

2° Dimensions.

Le calcul montre que la forme exponentielle (fig. 6-50) est la meilleure. La fréquence la plus basse transmise est fonction de la longueur. Pour une fréquence de 60 Hz il devrait avoir plusieurs mètres de longueur. De plus le diamètre de la bouche doit être égal ou supérieur au 1/4 de la longueur d'onde à la fréquence de coupure soit pour 60 Hz : 1,4 m.

Pour ne pas avoir des pavillons trop encombrants et coûteux on peut choisir une fréquence de coupure égale à 200 Hz par exemple et d'autre part diviser le pavillon en 3 tronçons repliés sur eux-mêmes (fig. 6-54).

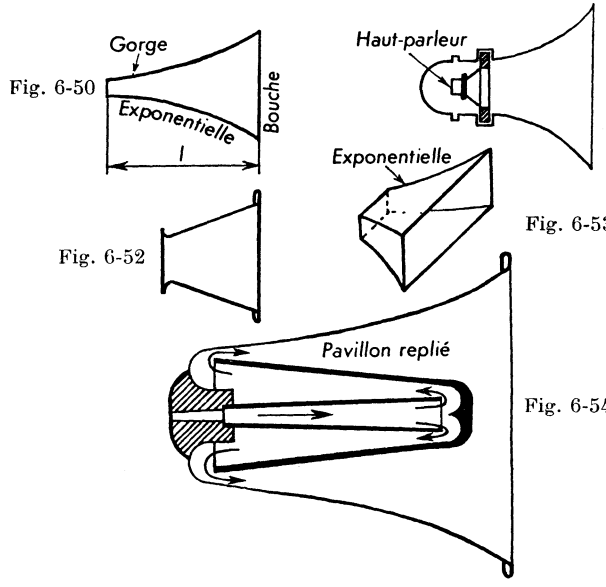


Fig. 6-50

Fig. 6-51

Fig. 6-52

Fig. 6-53

Fig. 6-54

Fig. 6-50 à Fig. 6-54. — Modèles de pavillons.

3° Forme.

— *exponentielle* : L'aire de la section transversale croît suivant une loi exponentielle avec la distance axiale. C'est la forme idéale recommandée mais pour des raisons de simplicité et de prix de revient on peut adopter des formes simplifiées.

— *conique* : L'aire de la section transversale croît comme le carré de la distance axiale. Sa fabrication est plus simple (fig. 6-42).

— *à section rectangulaire* : La forme est exponentielle dans le sens horizontal et à section constante dans le sens vertical. Cette forme se prête mieux à l'installation sur voiture publicitaire (fig. 6-53). La section des pavillons pour H.P. multicellulaires est aussi rectangulaire pour en faciliter la fabrication.

4° Fabrication.

Ils sont obtenus par moulage en alpax ou par repoussage de tôle d'aluminium. Le premier procédé se prête mieux à la fabrication de série et donne des pavillons plus rigides moins soumis à vibrations.

5° Propriétés.

a) Rendement.

Alors qu'il est de 3 à 8 % pour les haut-parleurs à baffle il va de 6 à 10 % avec les haut-parleurs à pavillon.

b) Puissance.

Pour une distorsion de 3 % on peut transmettre 5 W acoustiques par centimètre carré de bouche, à la fréquence de coupure. Cette puissance baisse rapidement pour un même taux de distorsion lorsque la fréquence augmente (1).

Afin d'obtenir une puissance mieux répartie sur la bande des fréquences à reproduire on utilise des *haut-parleurs multicellulaires* dans lesquels le haut-parleur est associé à plusieurs pavillons accolés ayant des fréquences de coupure étagées. La figure 6-55 montre l'aspect extérieur de haut-parleurs multicellulaires utilisés pour la diffusion de haute qualité dans les salles de cinéma.

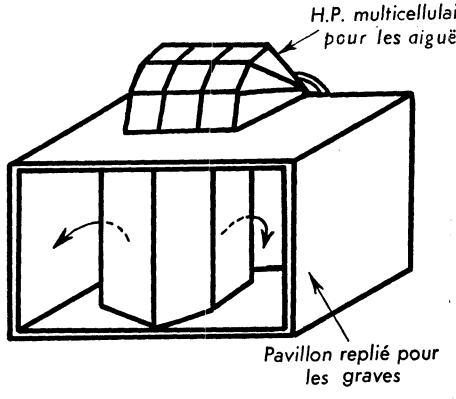


Fig. 6-55. — Haut-parleur pour salle de cinéma.

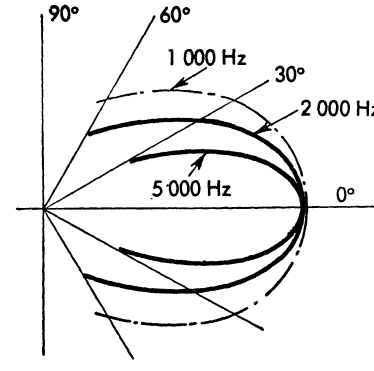


Fig. 6-56. — Diagramme directionnel d'un haut-parleur à pavillon.

c) Fréquence de coupure.

Si on envoie dans le haut-parleur des fréquences inférieures à la fréquence de coupure, la membrane n'est pas chargée, elle prend des amplitudes dangereuses et se détériore presque immédiatement. Pour l'éviter on place dans le boîtier du haut-parleur un filtre passe-haut qui coupe les fréquences inférieures à la fréquence de coupure.

d) Directivité.

On obtient avec les haut-parleurs à pavillon un effet directif très prononcé. La grande partie de l'énergie sonore est concentrée dans un angle solide de 60°. Le diagramme directionnel de la figure 6-56 montre l'allure

(1) Le taux de distorsion harmonique est proportionnel au carré de la fréquence.

des courbes obtenues avec un haut-parleur à pavillon. Cette propriété est recherchée pour concentrer la puissance dans une direction et éviter l'effet Larsen dans les systèmes de *diffusion publique* (public-adress).

e) Protections.

Le pavillon utilisé en extérieur protège le haut-parleur des poussières et de la pluie et facilite la manutention. La figure 6-51 montre un H.P. à pavillon simple.

6° Chambre de compression.

a) Principe.

Elle a pour but d'augmenter la résistance de rayonnement des haut-parleurs à pavillon et de les charger plus efficacement. Le rendement acoustique est porté entre 15 à 35 %. La membrane en se déplaçant comprime l'air dans la chambre de compression à la fréquence de modulation. Cette compression se propage de proche en proche dans les couches d'air successives du pavillon.

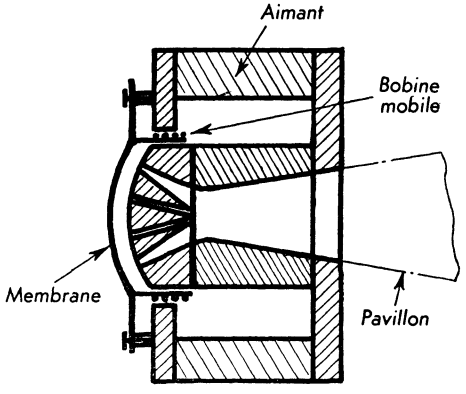


Fig. 6-57. — Chambre de compression.

b) Construction (fig. 6-57).

Le haut-parleur comprend un aimant permanent créant un champ magnétique puissant, une bobine mobile de 30 à 60 mm de diamètre, une membrane légère et rigide en aluminium en forme de calotte sphérique centrée à l'aide d'un spider.

La chambre de compression comporte plusieurs orifices de petits diamètres qui débouchent dans la gorge du pavillon.

La souplesse de la suspension de la membrane doit être suffisante pour obtenir une bonne reproduction des fréquences basses.

La courbe de réponse est d'autant plus étendue vers les fréquences élevées que le nombre d'orifices ou fentes de la chambre de compression est grand, ceci afin d'éviter l'affaiblissement dû aux interférences entre les ondes provenant de différents points de la membrane.

c) Utilisations.

Les haut-parleurs à chambre de compression sont utilisés avec des pavillons exponentiels pour les systèmes de diffusion publique en plein air ou dans des locaux de grandes dimensions. Leur haut rendement et leur directivité explique leur supériorité dans ces applications. Les portées acoustiques peuvent dépasser 1,5 km.

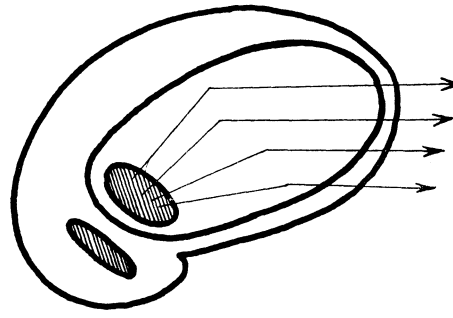


Fig. 6-58. — Conque « Élipson ».

7° Conque Elipson (fig. 6-58).

C'est un pavillon spécial de forme ellipsoïdale qui agit comme réflecteur de son et assure la concentration des sons pour toutes les fréquences supérieures à 800 Hz. Cet effet directif entraîne une réduction des effets d'écho au plafond et sur les murs des salles publiques.

C - Association de haut-parleurs.

1° Haut-parleurs à voies multiples.

On associe deux ou plusieurs haut-parleurs avec des réseaux séparateurs en vue d'élargir la bande de fréquences transmises ou d'obtenir un effet d'espace ou un effet stéréophonique.

Parmi les différentes solutions adoptées les principales sont :

a) Un haut-parleur de graves (21 cm)

associé avec un haut-parleur d'aiguës (tweeter électrostatique ou piézo-électrique) pouvant être placé au centre du premier.

b) Un haut-parleur pour les graves (30 à 38 cm)

Un haut-parleur pour les médiums (15 à 21 cm).
Un haut-parleur pour les aiguës (tweeter).

c) Un haut-parleur elliptique (21 à 32 cm)

Deux « tweeters » orientés à 25° de part et d'autre de l'axe assurant la distribution sonore afin d'éliminer la directivité constatée pour les aiguës.

d) Deux haut-parleurs électrodynamiques

identiques placés de 0,5 à 1 m l'un de l'autre, de façon à obtenir un effet d'espace rappelant l'origine spatiale différente des instruments d'un orchestre.

e) Deux haut-parleurs électrodynamiques

identiques placés à quelques mètres de distance et alimentés par deux voies dont les sons de l'une ont été déphasés dans le temps, donnant une sensation de profondeur (réverbération artificielle).

f) Deux haut-parleurs électrodynamiques

identiques placés à quelques mètres de distance et alimentés par deux voies complètement séparées depuis la prise de son et permettant d'obtenir une localisation en largeur des sons (stéréophonie).

2° Haut-parleurs combinés.

Ce sont des haut-parleurs associés à des écrans ou des pavillons en vue de leur fonctionnement simultané sous l'action d'une commande unique (dans les systèmes de diffusion publique : spectacles, églises, gares, foires, aérodromes...).

Pour la diffusion de qualité en intérieur les haut-parleurs peuvent être réunis dans un coffret rectangulaire allongé appelé *colonne acoustique*, dans laquelle l'orientation des haut-parleurs permet unes distribution uniforme de l'énergie sonore et donne un effet de présence remarquable.

3° Branchement pour sonorisation.

— Si la distance entre les haut-parleurs et l'amplificateur est inférieure à 50 m on utilise une ligne basse impédance, les haut-parleurs pouvant être montés en série, en parallèle ou série-parallèle.

— Si la distance est supérieure à 50 m on emploie soit une ligne 500 Ω avec un transformateur d'adaptation sur chaque haut-parleur ou, de plus en plus, une ligne 100 V qui permet une adaptation plus facile et moins coûteuse.

On appelle « sortie 100 V » une prise à haute impédance du transformateur de sortie qui pour tous les amplificateurs quelle que soit leur puissance nominale délivre une tension de 100 V au maximum de puissance. Les haut-parleurs sont branchés en parallèle sur cette ligne. L'adaptation des impédances est automatiquement réalisée lorsque la somme des puissances nominales des haut-parleurs branchés est égale à la puissance nominale de l'amplificateur.

VIII. DONNÉES NUMÉRIQUES.

1° Caractéristique de réponse.

La figure 6-59 indique la courbe de réponse d'un haut-parleur électrodynamique. On remarque la pointe de résonance principale du haut-parleur.

Elle peut être atténuée par l'utilisation d'une housse en toile ou par l'utilisation de la contre-réaction. Cette résonance se situe en général entre 80 et 150 Hz.

La courbe de réponse peut être considérée comme bonne, lorsqu'elle s'inscrit entre 30 et 10 000 Hz dans moins de 30 dB.

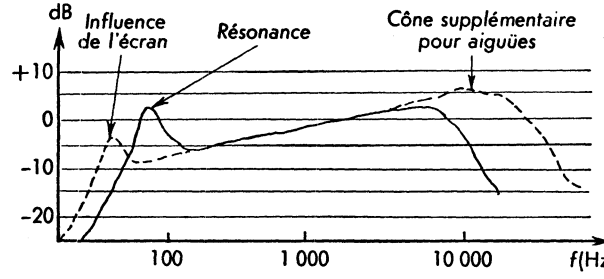


Fig. 6-59. — Caractéristique de réponse d'un H.P. électrodynamique.

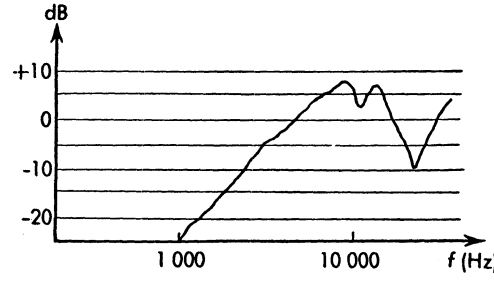


Fig. 6-60. — Caractéristique de réponse d'un H.P. électrostatique.

Les deux parties en pointillés montrent l'influence de l'écran sur le relèvement des basses et celle d'un cône supplémentaire spécial sur le relèvement des aiguës.

La figure 6-60 indique la courbe obtenue avec un haut-parleur électrostatique.

2° Diagramme directionnel.

Celui de la figure 6-61 montre l'effet directionnel obtenu aux fréquences élevées (à partir de 5 000 Hz) sur un haut-parleur électrodynamique. La courbe en pointillés montre la diminution de cet effet obtenue par l'utilisation d'un cône anti-directif fixé sur le noyau (fig. 6-63).

On peut noter par ailleurs que l'effet directif est pratiquement supprimé dans les salles ordinaires à cause des nombreuses réflexions sur les parois.

L'effet directif avec un haut-parleur à pavillon est nettement accusé, et l'énergie peut être concentrée dans un angle solide de 30°.

La figure 6-62 montre le diagramme directionnel d'un haut-parleur électrostatique.

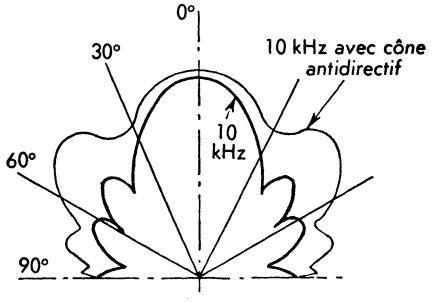


Fig. 6-61. — Diagramme directionnel d'un H.P. électrodynamique.

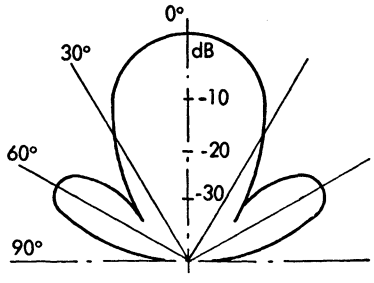


Fig. 6-62. — Diagramme directionnel d'un H.P. électrostatique.

La directivité assez marquée peut nécessiter l'emploi de deux tweeters orientés à 25° de l'axe principal de distribution sonore.

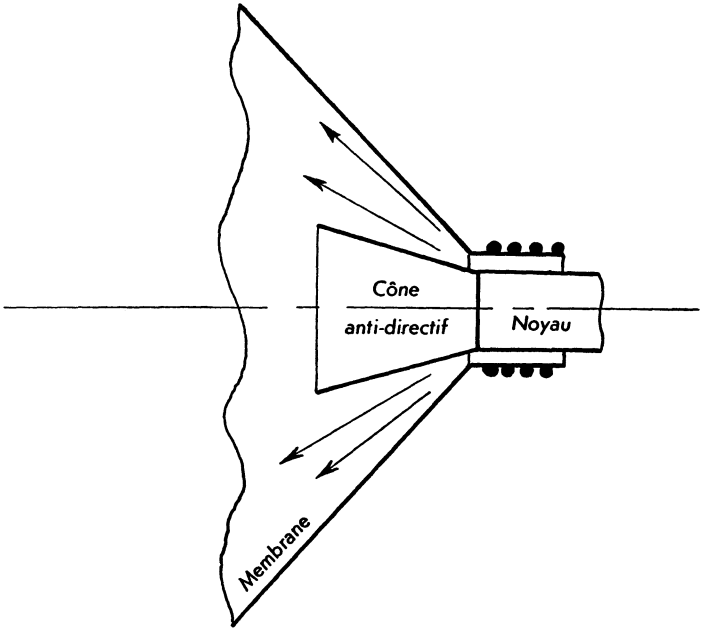


Fig. 6-63. — Cône anti-directif.

3° Puissance nominale.

Elle va, suivant les diamètres, de 0,2 W à 25 W. On ne doit pas la dépasser sous peine d'augmenter la distorsion, d'échauffer exagérément la bobine mobile. Pour des puissances supérieures on utilise plusieurs haut-parleurs.

4° Rendement.

Haut-parleurs à baffle : 3 à 8 %;
Haut-parleurs à pavillon : 6 à 10 %;
Haut-parleurs à chambre de compression : 15 à 35 %.

5° Impédance.

L'impédance de la bobine mobile est de 2,5 - 4 - 8 - 16 - 25 ou 50 Ω à 400 Hz.

6° Champ dans l'entrefer.

Il est égal à l'induction de l'aimant car $\mu = 1$. Elle va de 0,6 T à 1,2 T (6 000 à 12 000 G).

7° Dimensions.

A titre indicatif les dimensions des H.P. Audax sont :
H.P. circulaires : 4 - 6 - 7 - 9 - 10 - 12 - 17 - 19 - 21 - 24 - 28 - 34.
H.P. elliptiques : 10 - 14, 12 - 19, 16 - 24.

Les masses correspondantes vont de 50 g à 6 kg et les épaisseurs de 21 à 165 cm.

8° Conclusion.

Tous les perfectionnements apportés dans la construction des haut-parleurs (et de la chaîne de transmission depuis le microphone) n'ont de valeur que si la pièce où se fait l'audition a des qualités acoustiques satisfaisantes, et la disposition du (ou des) haut-parleur est correcte. Et ne jamais oublier que les facteurs physiologiques et psychologiques des auditeurs sont très importants. Ce qui peut paraître bon à l'un, ne l'est pas nécessairement à un autre.

IX. ÉCOUTEURS.

A - Ecouteur électromagnétique.

1° Principe (fig. 6-64).

Il est constitué par un aimant dont les deux pôles reçoivent chacun une bobine. Les bobines sont montées en série pour que leurs champs s'ajoutent. La membrane en acier doux, placée à une très faible distance des pôles de l'aimant, ferme le circuit magnétique.

Lorsque les bobines sont parcourues par le courant variable, il s'ensuit des variations d'induction magnétique qui font vibrer la membrane à la même fréquence.

2° Construction (fig. 6-65).

L'aimant a une forme particulière pour réduire son encombrement. Les bobines comportent un grand nombre de spires en fil de cuivre fin émaillé. La membrane en fer doux a 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur.

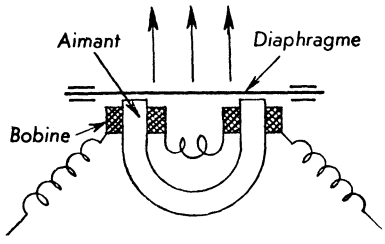


Fig. 6-64
Écouteur électromagnétique : principe.

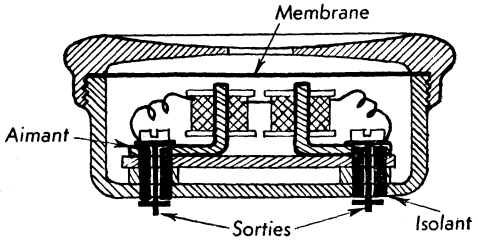


Fig. 6-65
Écouteur électromagnétique.

L'ensemble est enfermé dans un boîtier métallique ou en Bakélite. Les sons sont transmis à travers un trou circulaire du couvercle.

La bande de fréquence transmise va de 100 Hz à 4 500 Hz. L'inertie de la membrane empêche la restitution des fréquences plus élevées.

Des écouteurs à réluctance variable permettent d'obtenir une bande de fréquences allant de 500 à 10 000 Hz.

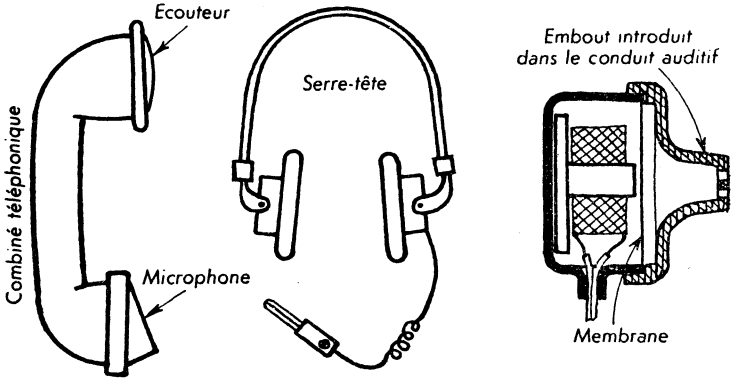


Fig. 6-66 à Fig. 6-68. — Modèles d'écouteurs.

L'impédance d'un écouteur magnétique est égale à 10 k Ω environ à 100 Hz. Si l'intensité qui le traverse ne dépasse pas 15 à 20 mA il peut être monté en série dans le circuit anodique du tube final (sinon brancher l'écouteur en parrallèle). Sur un casque les deux écouteurs sont généralement montés en série.

B - Autres types.

Les systèmes piézo-électriques et électrodynamiques permettent de réaliser des écouteurs de constitution analogue à celle des haut-parleurs mais ayant des dimensions réduites. Ils ont des courbes de réponse assez satisfaisantes permettant l'écoute musicale.

C - Utilisations.

— Combinés téléphoniques (fig. 6-66).

— Serre-tête et casques d'écoute (fig. 6-67), utilisés en aviation, en émission-réception d'amateur et en tous lieux où l'écoute ne doit pas gêner l'entourage. En milieu bruyant, ils sont munis d'oreillettes en mousse de latex affaiblissant les bruits ambiants.

Certains modèles sont spécialement étudiés pour l'écoute stéréophonique.

— Ecouteur interne (fig. 6-68).

CHAPITRE 7

LES SUPPORTS DU SON

I. DÉFINITIONS GÉNÉRALES.

— *Enregistrement* : Ensemble des techniques permettant de fixer une information sur un support matériel en vue de sa conservation et de sa reproduction à volonté. Support matériel des signaux enregistrés (disque, bande ou fil magnétique, pellicule photographique).

L'enregistrement est appelé direct si le support est utilisé directement pour la lecture sans traitement intermédiaire tel que galvanoplastie, tirage photographique, etc.

— *Caractéristique d'enregistrement* : Courbe de variation de l'état d'un support matériel d'enregistrement, en fonction de la fréquence, lorsqu'on applique au système un signal de niveau constant et de fréquence variable.

— *Lecture* : Action par laquelle les signaux enregistrés sont reconstitués dans leur forme initiale.

— *Compensations* (ou corrections) : Modifications systématiques de la caractéristique de réponse en fonction de la fréquence d'un élément d'un système d'enregistrement, ou de lecture, destinées à améliorer la qualité de ce système.

— *Précorrection* : Correction effectuée en un point d'un système d'enregistrement ou de lecture précédant un élément déterminé dont on veut corriger les caractéristiques (1).

— *Préaccentuation* : Opération consistant à relever une partie de la courbe de réponse d'un système d'enregistrement en vue d'égaliser la répartition statistique de l'énergie dans le domaine des fréquences acoustiques, avant d'appliquer le signal au support matériel (1).

(1) Le terme « prédistorsion » est à proscrire.

— *Désaccentuation* : C'est l'opération inverse de la précédente réalisée après lecture du signal enregistré en vue de rétablir la répartition initiale de l'énergie dans le domaine des fréquences acoustiques (1).

— *Bruit de fond* : Ensemble des signaux parasites existant en l'absence de tout signal utile.

— *Bruit de modulation* : Ensemble des signaux parasites produits par le signal utile, à l'exclusion des harmoniques ou des produits d'intermodulation de celui-ci.

— *Bruit de fond global* : Ensemble des signaux parasites superposés au signal utile et mesurés après élimination de ce signal.

— *Pleurage* : Effet parasite produit, lors de la lecture d'un signal enregistré, par les fluctuations de la vitesse de défilement du support, au cours, soit de l'enregistrement, soit de la lecture, et perçu par l'oreille en tant que variation de hauteur des sons (2).

— *Scintillement* : Effet parasite produit, lors de la lecture d'un signal enregistré, lorsque les fluctuations de la vitesse de défilement du support sont trop rapides pour être interprétées par l'oreille comme des variations de hauteur des sons.

— *Réenregistrement* : Opération consistant à enregistrer, par un procédé quelconque, le signal obtenu par la lecture d'un signal déjà enregistré.

— *Montage* : Opération destinée à permettre la lecture, sans interruption, d'enregistrements initialement séparés.

— *Mixage* : Opération destinée à permettre la lecture, sans interruption, d'enregistrements initialement séparés et de signaux directs que l'on peut éventuellement superposer.

— *Piste* : Région de la surface d'un support réservé à l'enregistrement d'un signal.

II. ENREGISTREMENT SUR DISQUE.

A - Description des disques.

Les *disques moulés* sont obtenus par moulage d'une matière thermoplastique au moyen de matrices réalisées à partir d'un disque enregistré. On distingue les disques à *sillon large* (standard) et les disques *microsillon* dont la largeur et la profondeur sont très inférieures à celles des enregistrements anciens (largeur inférieure à 0,1 mm).

(1) Le terme « post-accentuation » est à proscrire.

(2) Sur un appareil de qualité la variation de vitesse de défilement doit être inférieure à ± 0,3 % et inférieure à ± 0,1 % sur les appareils de haute qualité.

Les disques sont caractérisés par :

1° Le sillon (fig. 7-1).

Les deux profils utilisés ont leurs caractéristiques résumées dans le tableau ci-dessous.

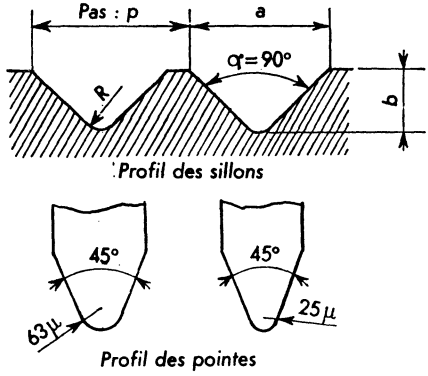


Fig. 7-1 à Fig. 7-3.

TABLEAU 7-1. — CARACTÉRISTIQUES DES SILLONS

	Sillon large	Microsillon
Forme	triangulaire arrondi au sommet	triangulaire arrondi au sommet
Angle α	90°	90°
Largeur a	0,125 à 0,170 mm	0,05 à 0,08 mm
Profondeur b	0,05 à 0,15 mm	0,03 à 0,04 mm
Pas p	0,25 mm	0,1 mm
Nombre de spires au cm	40	100
Rayon R	37 μ	12 μ

Le pas de sillonnage s'exprime généralement par le nombre de spires par centimètre. Il est constant pour les disques microsillons ordinaires mais un procédé d'enregistrement à pas variable permet de porter le nombre de spires au cm de 100 à 125.

2° Vitesse de rotation.

La vitesse qui est utilisée pour comparer les différents enregistrements est la vitesse de rotation en tr/mn qui doit être rigoureusement constante si l'on veut obtenir une audition de qualité.

Cette vitesse qui était de 78 tr/mn sur les anciens enregistrements a été portée à 45 et 33 tr/mn sur les microsillons et a permis des enregistrements de longue durée. (Un microsillon diamètre 30 cm, 33 tr/mn donne 23 mn d'audition par face et le sillon mesure environ 1 km de long). Des microsillons plus récents sont prévus pour une vitesse de 16 tr/mn donnant une très longue durée. Une vitesse aussi lente étant difficile à maintenir rigoureusement constante, ils sont sensibles au pleurage et au scintillement et ne peuvent actuellement prétendre à la haute qualité.

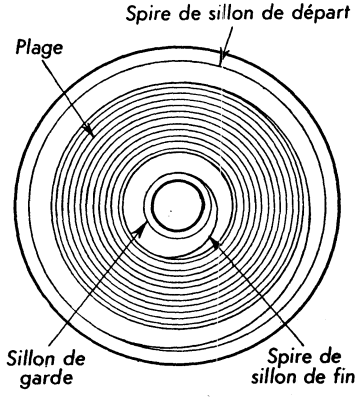


Fig. 7-4. — Disque.

3° Le diamètre.

Les diamètres standards sont 17,25 et 30 cm et correspondent au diamètre extérieur.

La *plage* d'enregistrement n'occupe pas toute la surface (fig. 7-4) car il faut prévoir des *spires de départ* et des *spires de fin* non enregistrées qui ont un pas supérieur au pas normal. Le disque peut comporter plusieurs plages séparées dans ce cas par des spires non enregistrées appelées *colimaçon* ayant un pas supérieur au pas normal et utilisées pour passer d'une plage à la suivante. Pour éviter la pointe de glisser jusqu'à la partie centrale du disque les spires de fin se terminent par un sillon circulaire et appelé *sillon de garde.*

Les caractéristiques des différents disques sont résumées dans le tableau suivant.

4° Matériau.

a) Disques à sillon large (standard).

Ils étaient constitués par de la gomme laque chargée avec du kaolin, de la poudre d'ardoise en proportions bien définies. Cette composition donne des disques durs et cassants.

b) Disques microsillons.

Ils sont en résines vinyliques (copolymère de chlorure et d'acétate de vinyle). On ajoute à cette composition un colorant (noir de fumée) et une substance stabilisatrice.

On obtient ainsi des disques durs ayant une grande élasticité les rendant pratiquement incassables. Le bruit de fond est réduit et les distorsions plus faibles.

TABLEAU 7-2. — CARACTÉRISTIQUES DES DISQUES

	N en tr/mn	∅ en cm	Durée en mn		Utilisations
SILLON LARGE	78	30 25	4,5 3		Anciens enregistrements
MICROSILLON	45	17	normal 4 prolongé 8		Surtout variétés
	33 1/3	30 25	Pas constant 22 à 24 13 à 17	Pas variable 25 à 32 17 à 23	Surtout musique de qualité
			Stéréophonique		Haute fidélité
	16 2/3	30	35 à 40		Très longue durée

B - Fabrication.

1° Gravure latérale (1).

a) Graveurs.

Le graveur est un transducteur électromécanique portant le burin de gravure transformant les signaux électriques en déplacements du burin sur le support d'enregistrement. Le burin, chauffé électriquement pour faciliter son travail, enlève un mince copeau pour former le sillon. On utilise des graveurs électromagnétiques, électrodynamiques ou piézo-électriques.

b) Gravure à vitesse constante.

La vitesse linéaire du burin de gravure est constante quelle que soit la fréquence. Il en résulte que plus la fréquence est élevée, plus l'amplitude des déplacements est faible. Dans ce mode d'enregistrement il est nécessaire d'avoir une amplitude très élevée pour les fréquences basses si l'on veut conserver une amplitude suffisante pour les fréquences élevées. Pour ne pas avoir de chevauchement entre spires on diminue l'amplitude des graves à l'enregistrement.

En fait on utilise ce mode de gravure sur les disques 78 tr/mn pour les fréquences supérieures à 250 Hz et la gravure à amplitude constante pour les fréquences inférieures (fig. 7-5 et 7-6).

(1) La gravure en profondeur n'est pratiquement pas utilisée.

c) Gravure à amplitude constante.

Dans ce mode de gravure qui est utilisé pour les disques microsillons, l'amplitude des oscillations du burin graveur est constante pour une même puissance sonore quelle que soit la fréquence (entre 30 et 15 000 Hz). On obtient ainsi un rapport plus grand entre le fortissimo et le pianissimo. Le rapport de dimensions entre l'amplitude et le grain de la cire est plus élevé et il en résulte un bruit de fond plus faible (fig. 7-7 et 7-8).

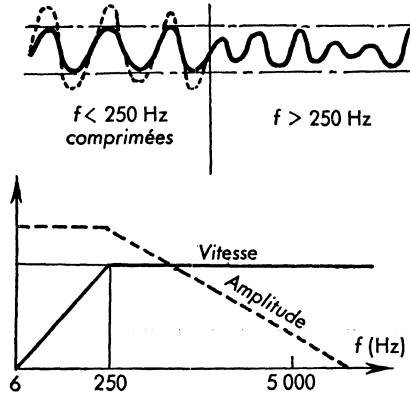


Fig. 7-5 et Fig. 7-6. — Gravure à vitesse constante

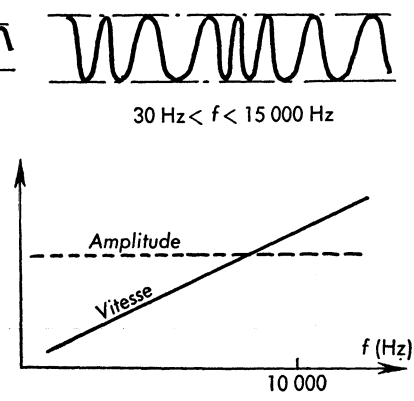


Fig. 7-7 et Fig. 7-8. — Gravure à amplitude constante.

2° Obtention des matrices (fig. 7-9 à 7-15).

a) Disque original.

C'est un disque obtenu par enregistrement direct et destiné à la fabrication d'un père, ou éventuellement, d'une pelure. Actuellement l'enregistrement préalable se fait toujours sur bande magnétique afin de pouvoir y apporter facilement les améliorations nécessaires (coupures, montages,

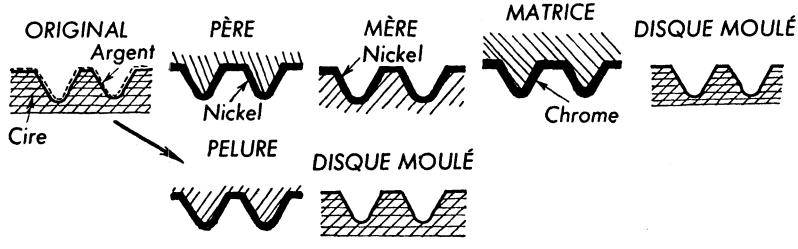


Fig. 7-9 à Fig. 7-15.

mixages, etc.). L'original est réalisé soit en cire spéciale soit constitué par un flanc d'aluminium recouvert d'un vernis d'acétate de cellulose qui forme le milieu d'enregistrement (disque verni).

Pendant la gravure le disque est maintenu très plan par un dispositif à dépression pneumatique. De nombreux contrôles sont effectués pendant la gravure par un microscope fixé à demeure sur la machine.

b) Disque « père ».

C'est une pièce métallique destinée à la réalisation d'une ou plusieurs mères. Il est obtenu par galvanoplastie qui consiste à déposer par électrolyse une couche de nickel de quelques centièmes sur l'original. Pour rendre celui-ci conducteur on dépose une pellicule fine d'argent par réduction de nitrate d'argent. On complète ensuite le nickelage par un cuivrage électrolytique afin d'obtenir une épaisseur suffisante.

c) Disque « mère ».

C'est une pièce métallique destinée à la réalisation d'une ou plusieurs matrices, obtenue à partir du père. Elle est obtenue aussi par galvanoplastie. La mère est vérifiée par audition et on y apporte les corrections nécessaires.

d) Matrice.

C'est la pièce métallique qui est utilisée directement pour le moulage. Elle est réalisée par le même procédé que les disques père et mère. Les matrices reçoivent en plus un dépôt de chrome qui leur confère une grande dureté.

Grâce à la suite des opérations précédentes il est possible à partir d'un père d'obtenir plusieurs mères et chacune d'elles permet d'engendrer plusieurs dizaines de matrices. Une bonne matrice sert au pressage d'environ 1 000 disques. Elles sont polies électrolytiquement de façon à ce que l'état de surface soit presque parfait.

e) Disques moulés.

Ce sont les disques, destinés à la vente, obtenus par moulage de résine vinylique. Les granules de matière thermoplastique sont chauffées au préalable dans un four à une température de 100 °C environ. La matière préchauffée est introduite sur la presse hydraulique en même temps que les étiquettes, entre les deux matrices correspondantes aux deux faces du disque. La température est portée à 150 °C environ puis la pression est établie pendant quelques secondes. On démoule après avoir ramener la température à 50 °C et enfin on ébarbe le bord du disque et on le contrôle visuellement. Des prélèvements sont régulièrement faits, suivis d'audition, servant à contrôler l'état de la matrice.

f) Pelure.

C'est une pièce métallique servant de matrice et obtenue directement à partir d'un original. Ce procédé plus simple est utilisé pour des disques de qualité ordinaire vendus en un seul tirage limité.

C - Défauts des disques.

— *Chevauchement* : Il est dû à une trop grande amplitude de gravure et se traduit par l'existence de points d'intersection entre les bords de deux spires adjacentes d'un sillon.

— *Diaphonie entre spires* : C'est un défaut de gravure, se traduisant, lors de la lecture d'un sillon, par l'apparition de signaux parasites dus à l'action, sur le lecteur, de la modulation des spires voisines.

— *Bruit de surface* : Signal parasite provoqué par les irrégularités de la surface du sillon en contact avec la pointe de lecture.

— *Moirage* : Défaut de gravure dû à une modulation à très basse fréquence de la largeur et de la profondeur du sillon et qui est révélé par un aspect anormal moiré de la surface du disque enregistré.

— *Broutement* : Défaut de gravure dû à une vibration verticale du burin de gravure se traduisant par un accroissement anormal du bruit de surface.

— *Effet de pincement* : Défaut de reproduction dû au mouvement vertical de la pointe de lecture qui résulte de la variation de la largeur du sillon dans les courbes.

III. ENREGISTREMENT MAGNÉTIQUE.

A - Description des supports magnétiques.

Bien que les supports magnétiques utilisés se présentent sous des formes très diverses rigides ou souples telles que ruban, fil, disque, cylindre, feuille (1), nous n'étudierons ici que les bandes magnétiques qui constituent le support de la majorité des enregistrements magnétiques. Elles ne servent pas seulement à enregistrer des sons mais aussi des signaux de télécommande ou des images de télévision.

Le type d'enregistrement peut être à modulation d'amplitude, de fréquence, ou d'impulsions.

1° Dimensions.

— *largeur* : 6,3 mm (exactement 6,245 ± 0,0025), 12,7 — 25,4 mm (professionnels) 50,8 (signaux images);

— *épaisseur* totale de : 20 à 70 μ (30 à 50 en moyenne). L'épaisseur de l'enduit magnétique va de 9 à 15 μ;

— *diamètre* : des bobines 80 mm à 250 mm donnant des longueurs de bandes de 60 m à 1 250 m.

(1) L'enregistrement sonore des films cinématographiques peut être réalisé sur piste magnétique sur la marge du film.

— *nombre de pistes :*
- une piste monaurale,
- deux pistes de 2,25 mm monaurales permettant de doubler la durée d'audition, séparées par une zone neutre de 0,75 mm,
- deux ou quatre pistes stéréophoniques.

2° Matériau.

Le support est en tri-acétate de cellulose (collodion) ou en polychlorure de vinyle.

Plus récemment sont apparus des supports en polyester (Mylar) ayant des qualités mécaniques supérieures permettant de réaliser des bandes extra-minces d'épaisseur 20 à 25 μ.

L'enduit est constitué par des particules d'oxyde de fer magnétique ($Fe_2 O_3$) de quelques microns de diamètre sous deux formes cristallines :

— cristaux cubiques (jaune ou brun clair) pour basses vitesses,

— cristaux en aiguilles (brun) pour hautes vitesses.

Les extrémités des bandes peuvent être métalliques pour obtenir l'arrêt automatique.

3° Vitesse de défilement.

La vitesse la plus courante est 19 cm/s. Les vitesses lentes (4,75 ou 9,5 cm/s) permettent des durées d'audition plus longues mais sont sensibles au pleurage et au scintillement.

Les vitesses rapides (38 ou 76 cm/s) sont utilisées sur les appareils professionnels. La bande passante augmente avec la vitesse de défilement.

B - Fabrication des bandes.

1° Support.

La matière synthétique de base est mélangée avec des plastifiants et des solvants pour obtenir une pâte homogène envoyée dans des filtres en Nylon et des réservoirs de dégazage. Après réglage de la viscosité la coulée est effectuée sur des tambours en fonte (diamètre 4 m, largeur 1,3 m) recouverts par électrolyse d'une couche de cuivre de 300 μ et d'une couche d'argent polie de 50 μ. La matière arrive par une fente réglable au micron près et se déverse sur une roue tournant à quelques mètres par minutes. L'épaisseur est contrôlée par un système optique interférentiel. L'intérieur du tambour est chauffé par un courant d'air et après 3/4 de tour le film est décollé puis séché.

La figure 7-16 montre schématiquement l'ensemble des opérations.

2° Enduit magnétique.

Il est constitué par un mélange de 25 à 35 % de poudres d'oxyde de fer ($Fe_2 O_3$) avec de l'acétate ou nitrate de cellulose ou de l'acétate vinylique.

L'oxyde ferrique est obtenu à partir de l'oxydation d'oxyde ferreux ($Fe_3 O_4$) dans un four. L'oxyde ferreux est généralement obtenu par précipitation du sulfate de fer par la soude.

Le mélange est homogénéisé par passage entre des cylindres de laminoir.

L'enduit est couché sur le support au moyen d'un cylindre trempant dans une cuve à niveau constant. Le support obtenu ainsi en grande largeur est séché aux infra-rouges et découpé en bandes de largeurs standard.

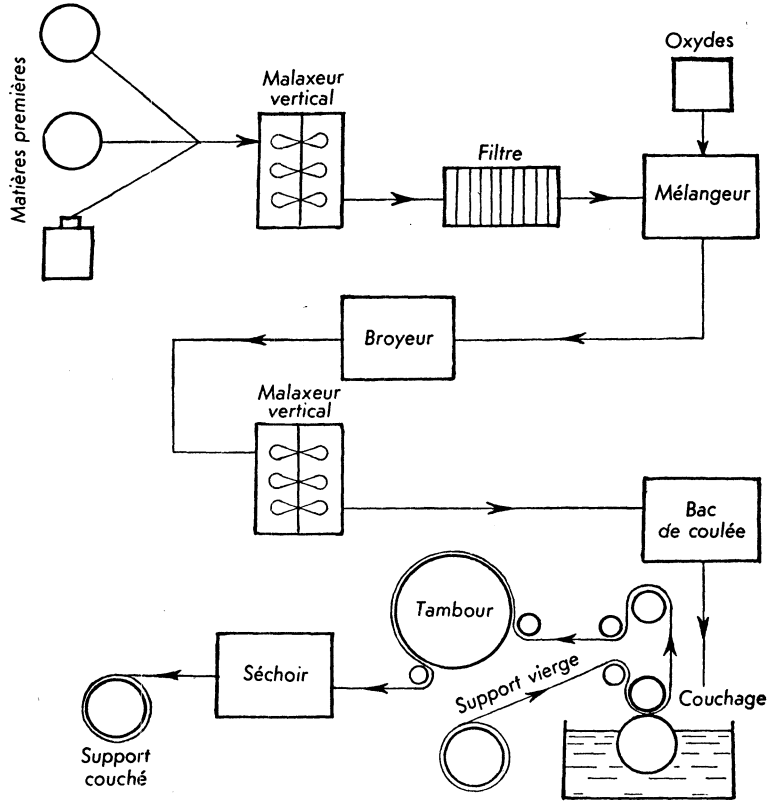


Fig. 7-16. — Fabrication des bandes magnétiques.

3° Contrôle des bandes.

— contrôle des dimensions : largeur et épaisseur,
— contrôles mécaniques : charge de rupture et élasticité,
— contrôles magnétiques :

Champ coercitif entre 20 000 et 30 000 A/m. Il doit être assez grand pour faciliter la reproduction des aiguës sans toutefois dépasser certaines valeurs rendant l'effacement difficile.

Induction rémanente entre 0,05 et 0,08 T. Elle doit être suffisante pour assurer un niveau sonore satisfaisant et une bonne conservation de l'enregistrement.

C - Défauts des bandes magnétiques.

— *Diaphonie* : Elle se traduit à la lecture de bandes à plusieurs pistes, par l'apparition de signaux parasites dus à l'action sur la tête de lecture, des signaux enregistrés sur une piste voisine. Elle doit être inférieure à — 40 dB entre deux pistes voisines.

— *Echo* : Signal parasite provoqué sur une spire par la présence des spires adjacentes. Le niveau de l'écho est généralement inférieur de 50 dB par rapport au niveau du signal qui l'a provoqué.

— *Bruit de fond* : Signal parasite provoqué par la nature du matériau magnétique utilisé. Le niveau du bruit de fond sans modulation est très faible, mais il augmente avec la modulation. Son niveau est inférieur de 45 dB au niveau de lecture standard.

— *Résidu d'effacement* : Celui qui subsiste après effacement d'un signal enregistré à 1 200 Hz, 24 heures avant l'effacement (— 70 dB).

— *Défauts de surface* (drop-out) : Ils sont produits par des poussières incrustées à la surface de la bande. Pour les diminuer on dépose sur les oxydes une pellicule extra-mince (0,5 μ) d'un composé organique résistant à l'usure et ayant un coefficient de frottement très faible. Ce procédé permet de dépasser 100 000 passages de la bande sans apparition de défauts de surface (30 000 passages pour une bande ordinaire).

IV. ENREGISTREMENT OPTIQUE.

A - Description des supports optiques.

L'enregistrement optique est un procédé dans lequel la conservation des signaux est assurée par la variation de transparence du support. Le support est constitué par une couche photographique susceptible d'être impressionnée par un flux lumineux variable.

B - Description des pistes.

Les différents procédés peuvent être classés en deux groupes qui sont :

1° Enregistrement à amplitude variable (ou à densité fixe).

La surface du support peut être divisée en deux régions l'une opaque et l'autre transparente. Le signal sonore est entièrement déterminé par la forme de la ligne de séparation entre les deux régions.

Un seul bord peut comporter des ondulations (trace unilatérale) ou les deux bords (trace bilatérale : fig. 7-17).

2° Enregistrement à densité variable.

La largeur de la modulation optique est constante et les signaux sonores sont conservés sous la forme de variations de densité optique (fig. 7-18).

Du point de vue qualité du son, les deux procédés donnent des résultats analogues mais l'enregistrement à densité variable est plus difficile à contrôler.

Avec les deux procédés on peut enregistrer plusieurs traces, le signal reproduit résultant de la combinaison des différents signaux.

Sur film sonore de 35 mm de largeur, la piste sonore a 2,54 mm.

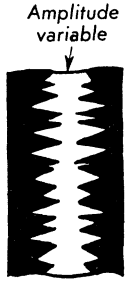


Fig. 7-17

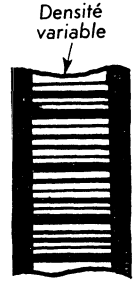


Fig. 7-18

C - Enregistrement.

1° Enregistrement à amplitude variable (R.C.A.).

Le faisceau lumineux envoyé par une lampe à filament de tungstène à argon traverse une fente et vient frapper un miroir tournant après avoir traversé un système optique. Le faisceau réfléchi vient impressionner le film après avoir traversé à nouveau une fente et un système optique. Les oscillations du miroir sont fonction de la modulation du signal sonore et lorsque le miroir tourne la largeur éclairée varie en conséquence impressionnant plus ou moins la piste (fig. 7-19).

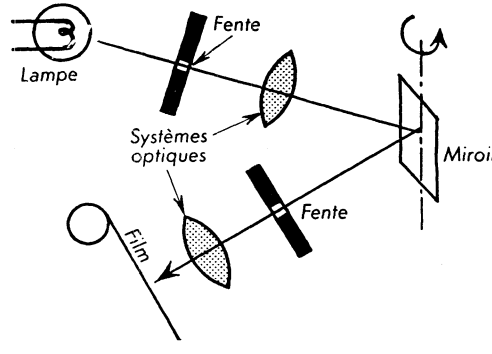


Fig. 7-19. — Enregistrement à amplitude variable.

2° Enregistrement à densité variable.

Le procédé le plus simple consiste à utiliser une lampe au néon dont l'intensité lumineuse émise dépend de la tension qui lui est appliquée. Des

dispositifs optiques permettent d'augmenter la densité lumineuse (fig. 7-20). La tension appliquée est évidemment modulée en fonction du signal sonore.

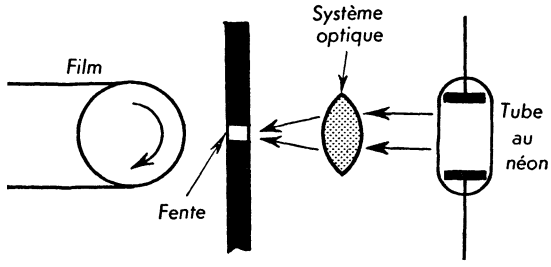


Fig. 7-20. — Enregistrement à densité variable.

Un autre procédé consiste à utiliser une cellule de Kerr (1) dont la transparence varie en fonction de la tension appliquée.

(1) Cellule faisant tourner le plan de polarisation de la lumière polarisée qui la traverse.

CHAPITRE 8

LES APPAREILS DE LECTURE

I. LECTEURS PHONOGRAPHIQUES (pick-up).

A - Généralités.

1° Définitions.

— *Lecteur* : Ensemble, démontable ou non, comprenant la tête de lecture et le bras de lecture.

— *Tête de lecture* : Transducteur électro-acoustique actionné par la modulation du sillon du support d'enregistrement en vue de la reproduction du signal enregistré.

— *Pointe de lecture* : Partie de la tête de lecture qui se trouve en contact direct avec le sillon.

— *Bras de lecture* : Pièce allongée supportant la tête de lecture et lui permettant de se déplacer sur la surface du disque.

2° Caractéristiques.

a) Efficacité (ou sensibilité).

C'est l'aptitude d'un lecteur à donner des tensions de sortie importantes pour des déplacements relativement faibles.

Dans le cas de lecteurs sensibles à la vitesse elle s'exprime en mV efficaces par cm/s de vitesse latérale, aux bornes de la résistance de charge. Dans le cas de lecteurs sensibles au déplacement (piézo-électriques) elle s'exprime en mV/cm de déplacement latéral.

Cette efficacité doit être mesurée à 1 000 Hz.

En choisissant une tension de référence U_0 on peut exprimer l'efficacité en décibels ($S = 20 \log U/U_0$).

b) Fidélité.

C'est l'aptitude d'un lecteur à se comporter de la même façon pour toutes les fréquences enregistrées sur le disque. Cette qualité est mise en évidence

au moyen de la caractéristique de réponse. La courbe de réponse indique le niveau de sortie en fonction de la fréquence. Elle doit théoriquement permettre la compensation de la caractéristique d'enregistrement.

c) Impédance.

C'est l'impédance de sortie du lecteur à 1 000 Hz qui permet de choisir le système d'adaptation à l'impédance d'entrée de l'amplificateur.

d) Caractéristiques mécaniques.

— *Souplesse latérale* (compliance) de l'équipage mobile : Combinée avec la masse totale du bras, elle détermine la fréquence de résonance mécanique inférieure qui se situe en 10 et 20 Hz avec les meilleurs lecteurs.

On la caractérise par le déplacement de la pointe en mm sous l'action d'une force d'un micro-newton. La souplesse latérale s'exprime donc en millimètres par micro-newtons. L'inverse s'appelle la raideur latérale.

— *Force d'appui verticale* (1) : Elle ne doit pas dépasser une certaine valeur minimale afin que la pointe ne saute hors du sillon lors des fortes modulations. Elle est exprimée vulgairement en grammes. La valeur moyenne obtenue sur les lecteurs actuels est de 0,1 newton (10 gp).

— *Souplesse verticale* : Elle doit être suffisante pour parer à l'effet de pince qui est un défaut de reproduction dû au mouvement vertical de la pointe de lecture qui résulte de la variation de la largeur du sillon due à la modulation. Elle améliore aussi la lecture des disques voilés.

— *Masse dynamique horizontale* : Localisée à la pointe de lecture. Elle s'exprime en milligrammes et sa faible valeur comprise entre 0,5 et 6 mg suivant les lecteurs correspond à une réduction d'inertie facilitant la reproduction des aiguës. C'est elle qui détermine la résonance supérieure de l'équipage mobile qui doit être rejetée au-dessus de 20 kHz.

3° Classification.

a) Lecteur électromagnétique.

La force électromotrice variable est produite par la variation de réluctance du circuit magnétique d'une bobine fixe.

b) Lecteur électrodynamique.

La force électromotrice variable est produite par l'action d'un champ magnétique constant sur un circuit électrique mobile.

c) Lecteur piézo-électrique.

La force électromotrice variable résulte de l'effet piézo-électrique d'un cristal soumis à des forces mécaniques variables.

d) Autres types.

D'autres systèmes ont été imaginés mais n'ont pas permis actuellement de réalisation industrielle en grande série.

(1) Dénommée à tort pression d'aiguille.

Lecteur électrostatique dont le principe est basé sur la variation de résistance électrique d'un circuit sous l'action des déplacements de la pointe de lecture.

Lecteur à inductance variable dont le principe est basé sur la variation de l'inductance d'une bobine sous l'action des déplacements de la pointe de lecture.

Lecteur électronique dont le principe est basé sur l'action mécanique des déplacements de la pointe de lecture sur une électrode d'un tube électronique.

Lecteur photo-électrique dont le principe est basé sur la variation d'éclairement d'une cellule photo-électrique produite par la coupure plus ou moins prononcée d'un faisceau lumineux au moyen d'une palette commandée par les déplacements de la pointe de lecture.

B - Têtes de lecture électromagnétiques.

1° Principe (fig. 8-1).

La tête de lecture est composée d'un aimant permanent produisant un champ magnétique constant et d'une armature constituée par un métal à haute perméabilité sur laquelle est fixée la pointe de lecture. Les oscillations de l'armature entraînent des déplacements correspondants des lignes de forces du champ magnétique. L'intensité du flux magnétique qui traverse la bobine est proportionnelle à l'amplitude des déplacements de l'armature. Il en résulte la production d'une force électromotrice d'induction variable dans la bobine.

L'armature est maintenue en position d'équilibre par un amortisseur en caoutchouc qui ne doit pas gêner ses oscillations.

Ce système utilisé sur des modèles ordinaires a des défauts importants dont les principaux sont un poids trop grand, une souplesse insuffisante et des résonances. Ils ont été éliminés sur les modèles récents par l'emploi de matériaux nouveaux et une conception différente bien que le principe reste le même.

2° Différents modèles.

a) Tête de lecture à réluctance variable « General Electric Co » (fig. 8-2).

— L'aimant est du type Ticonal et le circuit magnétique est en permalloy à forte perméabilité. Lorsque la palette oscille, la réluctance de chaque pièce polaire varie et les variations du flux magnétique induisent des forces électromotrices variables dans les deux bobines montées en série. La suspension de la palette ne nécessite plus d'amortisseur.

b) Tête de lecture magnéto-dynamique « Philips » (fig. 8-3).

Ce modèle comporte un aimant cylindrique ($\varnothing = 0{,}8$ mm) en Ferroxdur, mobile autour de son axe vertical sur lequel est fixé la palette portant la pointe de lecture. Le Ferroxdur a la particularité de pouvoir être aimanté

transversalement. Les deux bobines sont montées sur un étrier en U fermant le circuit magnétique en Mumétal. Lorsque par suite des oscillations de la pointe l'aimant pivote autour de son axe, il se produit des variations du flux magnétique dans chaque branche du circuit qui induisent une force électromotrice variable dans les bobines.

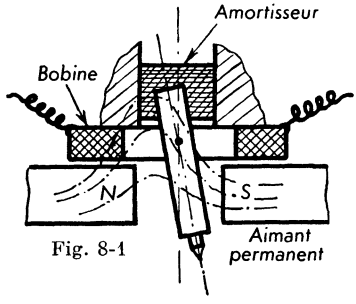


Fig. 8-1

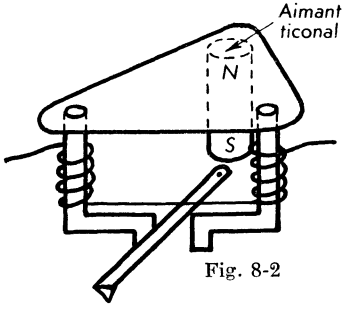


Fig. 8-2

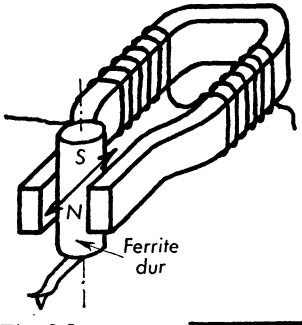


Fig. 8-3

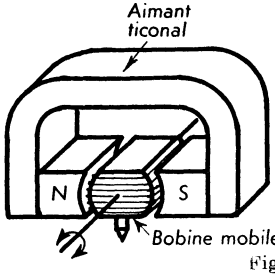


Fig. 8-4

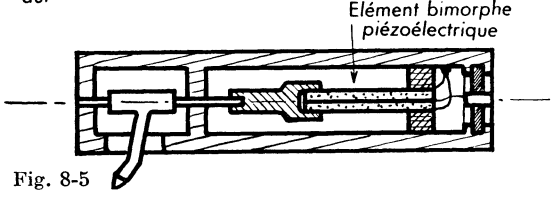


Fig. 8-5

Fig. 8-1 à Fig. 8-5. — Têtes de lecture.

3° Limites d'emploi.

a) Lecteurs magnétiques anciens.

Inconvénients : Ils sont lourds. Les fréquences élevées sont mal reproduites ainsi que les transitoires donnant ainsi de la distorsion harmonique. Ils présentent des pointes de résonance.

Avantages : Bas prix de revient. Robustes. Ils donnent des tensions de sortie élevées (0,1 à 1 V). Etant à haute impédance (5 000 à 20 000 Ω) ils ne nécessitent pas de transformateur d'adaptation.

b) Lecteurs magnétiques récents.

Inconvénients : La tension délivrée à la sortie est faible (0,01 à 0,1 V) et nécessite un amplificateur supplémentaire. Ils sont à basse impédance car les bobines comportent peu de spires (50 à 300 Ω). Ils nécessitent donc un transformateur d'adaptation (1). Ils ont un prix élevé.

Avantages : Ils sont beaucoup plus légers. Leur masse a pu être ramenée entre 10 et 30 grammes. Ils ont une bonne fidélité (caractéristique de réponse droite entre 50 Hz et 10 000 Hz) et reproduisent mieux les transitoires.

C - Têtes de lecture électrodynamiques.

1° Principe (fig. 8-4).

La tête de lecture est composée d'un aimant permanent (Ticonal, Alcomax) créant un champ constant intense. La pointe de lecture est fixée sur une carcasse de bobine en matière plastique sur laquelle sont bobinées une cinquantaine de spires de fil fin en cuivre. La bobine oscille autour de son axe horizontal en fonction des déplacements de la pointe de lecture dans le sillon. Les spires sont coupées par un flux plus ou moins grand suivant l'inclinaison et la variation du flux provoque une force électromotrice induite dans la bobine proportionnelle à la longueur du fil et à la valeur du champ magnétique ($e = H.l.v$).

La longueur du fil doit être limitée à cause de l'augmentation exagérée du poids de la tête. C'est la valeur élevée du champ obtenue avec les aciers à aimant modernes qui a permis d'améliorer les qualités des pick-up électrodynamiques.

Le système est doté d'un amortisseur empêchant la bobine de verser et atténuant les résonances mécaniques.

2° Limites d'emploi.

a) Inconvénients.

La tension de sortie est très faible (0,005 à 0,01 V) et nécessite un préamplificateur. Ayant peu de spires l'impédance est faible (50 à 200 Ω à 1 000 Hz) et il faut un transformateur d'adaptation. Système assez coûteux.

b) Avantages.

La grande souplesse entraîne une usure plus faible des disques et une bonne reproduction des transitoires. La légèreté (10 grammes environ) et la proportionnalité de la force électromotrice à la vitesse de déplacement du conducteur en fait un système très fidèle (caractéristique de réponse droite de 50 Hz à 15 000 Hz.

(1) Le pick-up magnétodynamique décrit à la fig. 8-3 comporte un grand nombre de spires et ne nécessite pas de transformateur d'adaptation.

D - Têtes de lecture piézo-électriques.

1° Principe (fig. 8-5).

Il est constitué par un cristal bimorphe en sel de Seignette (revoir chapitre 5) qui travaille en torsion sous l'action mécanique des déplacements latéraux de la pointe de lecture. La force électromotrice e obtenue est proportionnelle au déplacement latéral x de la pointe ($e = kx$). Les tensions sont recueillies par des électrodes d'argent. Le porte-pointe est guidé dans des bagues en caoutchouc et comporte en bout une pince dans laquelle vient s'emboîter l'élément bimorphe.

Pour diminuer les résonances, on place entre la pince et le cristal un amortisseur en caoutchouc spécial. Pour la même raison l'élément bimorphe est entouré d'une gelée à base de silicones qui assure en plus une protection supplémentaire contre l'humidité.

Le boîtier est généralement en matière plastique qui donne des têtes plus légères que ceux moulés sous pression en zamak.

2° Différents cristaux piézo-électriques.

Le sel de Seignette constitue la majorité des éléments piézo-électriques utilisés. Néanmoins d'autres substances sont employées pour la construction des lecteurs piézo-électriques. Les propriétés comparatives sont données dans le tableau suivant.

TABLEAU 8-1. — CARACTÉRISTIQUES DES CRISTAUX PIÉZO-ÉLECTRIQUES

	Appellation commerciale	Constante piézo-électrique	Température maximale	humidité
Bitartrate double de sodium et potassium	Sel de Seignette	$+ 8\,000 \times 10^{-8}$ u·e·s· (1)	50 °C	sensible
Phosphate dihydrogéné d'ammonium $(NH_4)H_2OP_4$	P.N. ou (A.D.P.)	$+ 100 \times 10^{-8}$ u·e·s·	100 °C	sensible
Titanate de baryum (céramique) $BaTiO_3$	Tibalit	$+ 500 \times 10^{-8}$ u·e·s·	70 °C	insensible

(1) L'unité de constante piézo-électrique dans le système *SI* est le coulomb par newton qui est égal à 3.10^4 *u·e·s.*

Les éléments d'A.D.P. ont d'autre part une capacité parallèle beaucoup plus faible que celle des cristaux de sel de Seignette (quelques centaines de pF au lieu de 2 000 pF) ce qui nécessite une grande résistance d'entrée de l'amplificateur afin de ne pas affaiblir fortement les graves et il faut une liaison très courte à l'amplificateur.

Quant aux éléments céramiques leur fabrication est difficile et leur prix de revient élevé. C'est surtout la constance de leurs propriétés en fonction de la température (— 40 à + 70 °C) et leur insensibilité à l'humidité qui les avantagent dans certaines applications. La tension délivrée de 0,1 V est plus faible qu'avec le sel de Seignette.

3° Limites d'emploi.

a) Inconvénients.

La raideur mécanique de l'ensemble est élevée d'où une difficulté de reproduction des fréquences élevées et des transitoires. Les lecteurs piézoélectriques à sel de Seignette sont sensibles à la chaleur et à l'humidité. Ils sont fragiles et il faut éviter les chocs.

b) Avantages.

La tension de sortie élevée (1 à 2 V) permet leur branchement direct à l'entrée B.F. d'un radiorécepteur. Ces lecteurs favorisent la reproduction des graves d'où avantage pour l'emploi avec les radiorécepteurs qui sont souvent déficients aux fréquences basses.

Ils sont à haute impédance (100 à 500 k Ω) et ne nécessitent donc pas de transformateur.

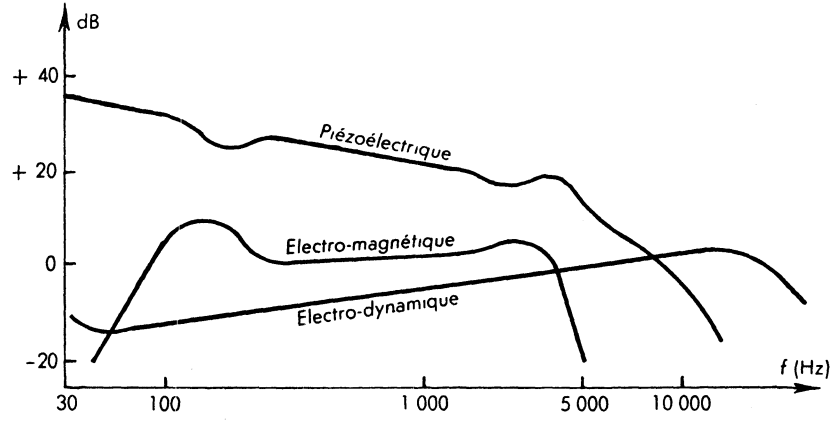


Fig. 8-6. — Caractéristiques de réponse de différents types de têtes de lecture.

Leur caractéristique de réponse relevée vers les graves permet de compenser les déficiences de l'enregistrement.

Ils sont légers (10 grammes) et peu coûteux. Tous ces avantages expliquent leur succès.

4° Comparaison des différents types.

Le tableau suivant résume les propriétés des différents types de têtes de lecture et la figure 8-6 montre les courbes de réponse.

TABLEAU 8-2. — COMPARAISON DES TÊTES DE LECTURE

	Tension de sortie	Fidélité	Impédance à 1 000 Hz	Force d'appui grammes poids	Prix
Magnétiques anciens	0,1 à 1 V	30 Hz à 5 000 Hz	5 000 à 20 000 Ω	> 30	(amateurs) peu coûteux
Magnétiques modernes	0,01 à 0,1 V	50 Hz à 10 000 Hz	50 à 300 Ω (transfo.)	10 à 30	(professionnels) prix élevé
Electro-dynamiques	0,005 à 0,01 V	50 Hz à 15 000 Hz avantage aiguës	50 à 200 Ω (transfo.)	10	assez coûteux
Piézo-électriques	1 à 2 V pas de préampli	30 Hz à 18 000 Hz avantages graves	100 000 à 500 000 Ω	8 à 10	peu coûteux

5° Tête de lecture stéréophonique.

Dans la méthode Westrex ou Système 45/45 qui est généralement adoptée, le burin graveur enregistre les deux canaux sur chacun des flancs du

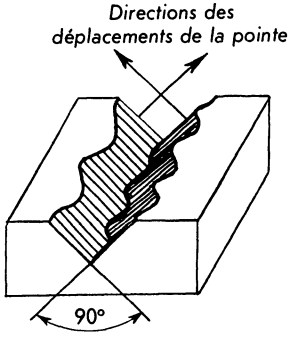


Fig. 8-7. — Sillon de disque stéréophonique.

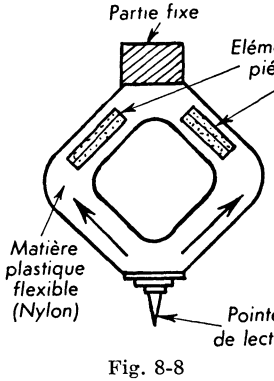


Fig. 8-8

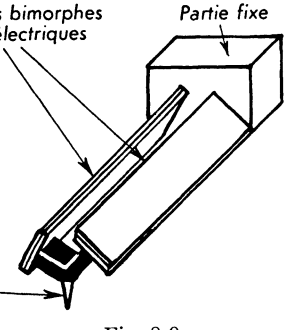


Fig. 8-9

Tête de lecture stéréophonique.

sillon. Les flancs sont inclinés à 45° et les mouvements sont perpendiculaires à chacun des flancs (fig. 8-7). Les têtes de lectures stéréophoniques utilisent les mêmes principes que les têtes normales (électromagnétiques,

électrodynamiques, piézo-électriques). La figure 8-8 montre le principe d'une tête piézo-électrique comportant deux éléments bimorphes travaillant en flexion pour chacune des deux composantes obliques du déplacement de la pointe de lecture. Les variations de tensions obtenues sont dirigées sur deux canaux amplificateurs distincts aboutissant à deux haut-parleurs. Un autre exemple de tête stéréophonique piézo-électrique est indiqué à la figure 8-9.

E - Pointes de lecture.

Les aiguilles d'acier ont été abandonnées parce que l'usure rapide de la pointe produisait des facettes capables d'endommager le disque et donnait des poussières métalliques s'incrustant dans les flancs du sillon (durée : 1 ou 2 disques).

Actuellement on emploie surtout des saphirs dont les profils standard et microsillon ont été donnés aux figures 7-2 et 7-3. Leur dureté et leur excellent poli permettent d'obtenir plus de 50 heures d'audition. Ils sont fragiles.

Les pointes de diamant qui subissent un très haut degré de polissage permettent une durée d'audition presque illimitée (plusieurs milliers d'heures). Elles sont très robustes mais leur prix de revient est élevé du fait des difficultés de taille et de polissage.

F - Bras de lecture.

1° Qualités.

Le bras de lecture est une pièce allongée supportant la tête de lecture et lui permettant de se déplacer sur la surface du disque.

Il doit posséder les qualités suivantes :

— Etre très léger afin que l'inertie qui s'oppose aux déplacements verticaux et horizontaux soit faible. Lorsqu'un bras lourd ne peut être évité il doit être équilibré par un ressort et non par un contrepoids (masselotte) qui viendrait accroître la masse.

— Sa forme est étudiée pour diminuer les distorsions dues à l'erreur de piste.

— Etre exempt de résonances tombant dans la gamme des fréquences reproduites.

— L'articulation doit être souple.

2° Erreur de piste.

A l'enregistrement, la tête de gravure se déplace suivant la ligne MN (fig. 8-10) alors que la tête de lecture se déplace suivant un arc de cercle du fait que le bras est articulé au point A. Il en résulte une différence dans les directions des vitesses latérales de la pointe de lecture et du burin graveur, appelée erreur de piste, cause de distorsions harmoniques.

Théoriquement la direction du bras devrait être tangente à toutes les spires du sillon, ce qui ne peut être obtenu qu'avec le point A rejeté à l'infini. Il est donc nécessaire d'avoir un bras le plus long possible mais on est limité par l'encombrement.

Pour un bras droit on choisit le point d'articulation sur la tangente à la spire médiane.

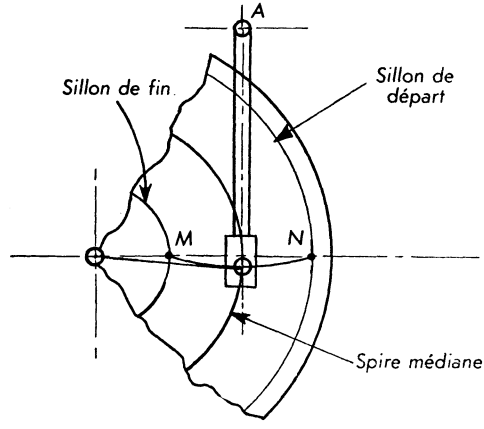


Fig. 8-10. — Bras de lecture droit.

L'emploi de bras courbe (fig. 8-11) permet de diminuer le défaut de reproduction dû à l'erreur de piste. Cette forme incurvée a d'autre part l'avantage de créer à partir de la force exercée par le disque sur l'aiguille une composante F_1 qui facilite le déplacement du bras vers le centre, permet de gagner

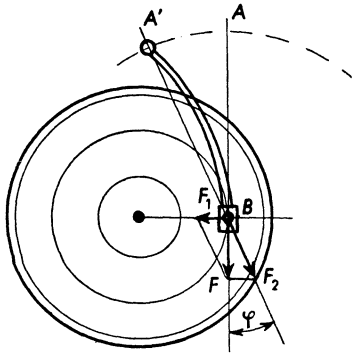


Fig. 8-11
Influence d'un bras de lecture courbe.

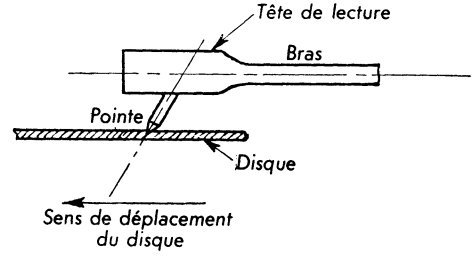


Fig. 8-12.

plus facilement la spire de départ quand on pose la tête de lecture sur le disque et enfin permet d'actionner plus efficacement l'interrupteur en fin de lecture. La pointe de lecture est inclinée pour éviter l'arc-boutement sur le disque (fig. 8-12).

3° Fabrication.

La figure 8-13 montre un exemple constructif de bras de lecture en matière plastique moulée monobloc. D'autres modèles possèdent deux extrémités en matière plastique rapportées sur une tige métallique creuse.

La tête de lecture est centrée sur deux pivots assurant les contacts électriques.

Les meilleurs bras sont articulés sur billes.

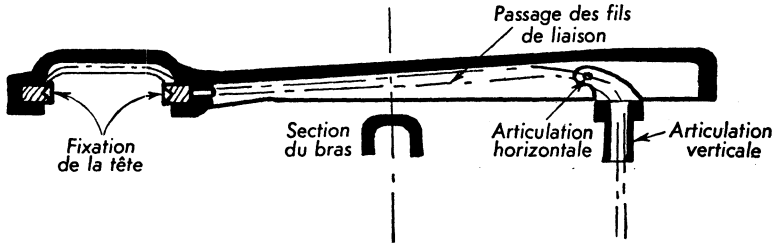


Fig. 8-13. — Bras de lecture.

G - Tourne-disques.

1° Le plateau.

Sa vitesse de rotation doit être rigoureusement constante si l'on veut éviter les effets de pleurage et de scintillement. Il doit être assez lourd, l'inertie jouant alors comme régulateur de vitesse. Ils sont coulés sous pression en Alpax ou Zamak (quelquefois en Bakélite). Ces alliages amagnétiques évitent l'attraction qui pourrait se produire avec les têtes magnétiques ou électrodynamiques.

Son usinage doit être précis. Il faut éviter l'excentrage qui provoque une variation de vitesse. Il faut veiller à l'utilisation à ce qu'il soit bien horizontal. Il est monté sur bagues en bronze fritté autolubrifiant ou sur billes.

Pour obtenir l'adhérence du disque il est recouvert de caoutchouc synthétique lavable ou de feutrine plus élastique et dans laquelle s'incrustent facilement les particules de poussières dures qui pourraient abîmer le disque.

2° Moteur.

La puissance des moteurs actuels dépasse rarement 10 à 15 watts. Différents types peuvent être utilisés mais ce sont les moteurs asynchrones monophasés à induction qui sont les plus employés actuellement.

a) Moteur asynchrone monophasé à induction.

— *Induit* : Il est constitué par une cage d'écureuil formée de tiges en fer doux à âme de cuivre soudées à deux plaques de cuivre.

— *Inducteur* : Il est formé d'un circuit magnétique en tôles de ferro-silicium avec un enroulement pour les moteurs à 2 pôles (fig. 8-14) ou deux enroulements pour les moteurs à 4 pôles (fig. 8-15).

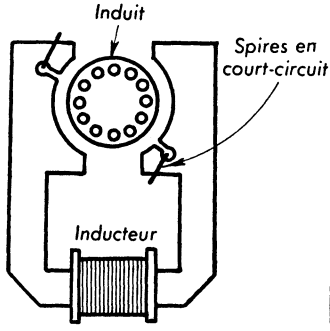


Fig. 8-14. — Moteur à 2 pôles

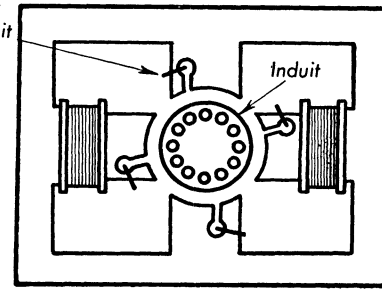


Fig. 8-15. — Moteur à 4 pôles.

— *Champ tournant* : Il est réalisé par des spires en court-circuit fixées dans les encoches des pièces polaires et créant un déphasage permettant le démarrage.

— *Vitesse* : Dans le moteur à deux pôles le rotor tourne théoriquement à la fréquence du secteur 50 Hz c'est-à-dire à 3 000 tr/mn. En réalité la vitesse est de 2 940 tr/mn.

Pour les moteurs à 4 pôles la vitesse est moitié moindre soit 1 470 tr/mn.

Les moteurs à 4 pôles sont plus lourds et plus volumineux que ceux à 2 pôles mais, tournant moins vite, ils facilitent la réduction de vitesse.

Les paliers très précis sont soit des roulements de précision ou des bagues en bronze fritté autolubrifiant.

— *Avantages* : La vitesse de ces moteurs peut être considérée comme constante et ils ne nécessitent pas de régulateur centrifuge. Ils ne produisent pas de parasites comme les moteurs à collecteur. Leur rayonnement magnétique extérieur est faible ce qui est avantageux pour l'emploi de têtes magnétiques.

b) Autres types.

Sur appareils professionnels on trouve des moteurs asynchrones diphasés à déphasage par condensateurs (plus puissants), des moteurs synchrones à 24 pôles (vitesse rigoureusement constante), des moteurs à collecteur à courant continu alimentés en 6-12-24 ou 48 volts (installations mobiles).

3° Entraînement.

a) Principe.

Soit un moteur accouplé directement au plateau par une roue d'entraînement (fig. 8-16). Si N et D sont la vitesse et le diamètre de la roue motrice N' et D' la vitesse de rotation du plateau et son diamètre on a :

$$\frac{N'}{N} = \frac{D}{D'} \text{ soit } N' = N \cdot \frac{D}{D'}.$$

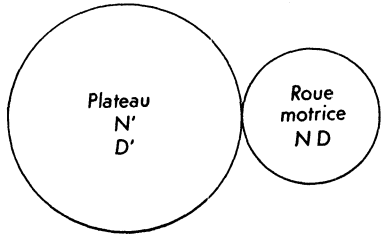


Fig. 8-16.

Pour obtenir 3 ou 4 vitesses du plateau, N étant constant il suffit de faire varier D puisque D' est aussi constant. Les trois modes d'entraînement qui permettent le changement de vitesses sont généralement les engrenages, les roues de friction et les poulies-courroies.

b) Différents modes d'entraînement.

— *Engrenages* : On utilise un couple de roue et vis sans fin pour obtenir une réduction de vitesse suffisante et un engrenage balladeur permettant le changement de vitesses. On obtient des vitesses de rotation précises et la longévité du système est grande avec des engrenages de précision noyés dans l'huile. Par contre l'ensemble est coûteux et les vibrations du moteur sont reportées plus fortement sur le plateau. Cette transmission est peu utilisée.

— *Roues de friction* : Le système comporte 3 ou 4 roues de friction de diamètres correspondants aux différentes vitesses à obtenir (78-45-33 1/3 — 16 2/3 tr/mn). L'entraînement du plateau est réalisé par l'intermédiaire d'un galet dont le diamètre fixe n'intervient pas dans le rapport des vitesses. La figure 8-17 indique une solution dans laquelle les différentes vitesses sont obtenues par des déplacements combinés en hauteur et latéral du galet intermédiaire au moyen d'un levier. Une autre solution indiquée à la figure 8-18 permet le changement de vitesse par déplacement latéral de 3 roues de diamètres différents au moyen d'un secteur articulé au point A.

Les roues de diamètres différents sont généralement en laiton usiné avec grande précision. Le galet intermédiaire comporte une surface de roulement en caoutchouc meulée pour le rendre parfaitement circulaire. Le caoutchouc évite le glissement et amortit les vibrations provenant du moteur.

Le galet peut entraîner le plateau par l'extérieur ou par l'intérieur. Cette deuxième solution permet de diminuer l'encombrement.

Le moteur est fixé par l'intermédiaire d'une suspension élastique (moteur flottant) afin d'amortir les vibrations. La figure 8-19 montre une autre solution avec roue de friction conique et galet coulissant.

— *Poulies courroies* : Ce système (fig. 8-20) est souvent employé sur les tourne-disques professionnels. Le changement de vitesses s'effectue en déplaçant la courroie sur les poulies de différents diamètres. Des solutions mixtes existent comportant un entraînement par un seul étage poulies,

courroies et 3 galets de friction pouvant entraîner séparément le plateau. Un débrayage permet de désaccoupler le galet à l'arrêt pour empêcher sa déformation.

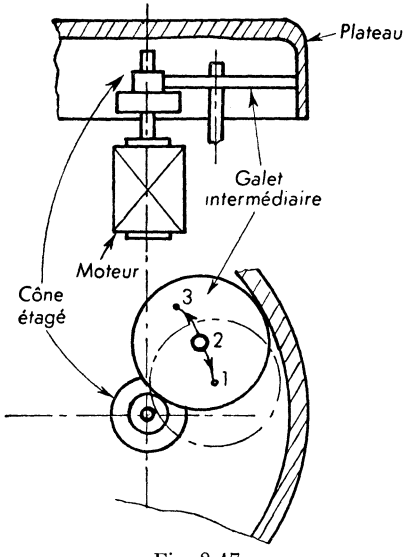


Fig. 8-17

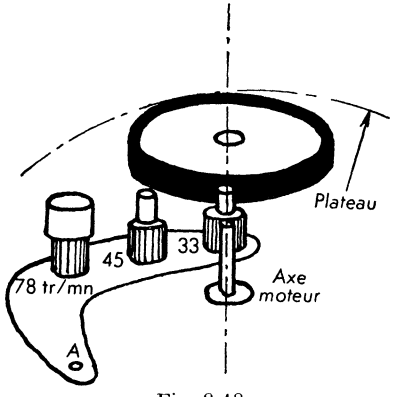


Fig. 8-18

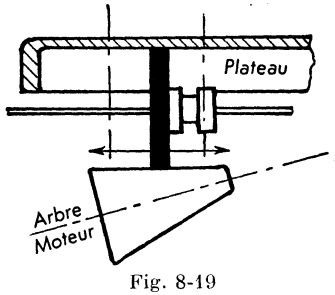


Fig. 8-19

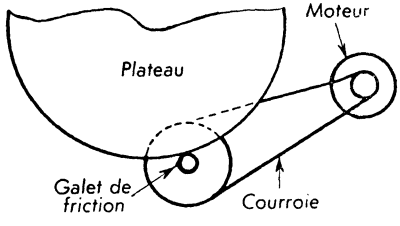


Fig. 8-20

Fig. 8-17 à Fig. 8-20. — Dispositifs d'entraînement des plateaux de tourne-disques.

— *Changement de vitesses électronique* : Employé sur certains appareils professionnels il consiste à utiliser un oscillateur à 4 fréquences fixes (4 vitesses) et alimentant un moteur asynchrone.

4° Arrêt automatique.

Il est obtenu par action d'un interrupteur lorsque le bras arrive en fin de course par l'une des trois méthodes suivantes :

a — *Arrêt par position déterminée du bras.*

L'inconvénient est que le sillon de fin n'a pas le même diamètre sur tous les disques et le système doit être adapté en conséquence.

b — *Arrêt par sillon excentrique.*

L'arrêt est provoqué par le mouvement de va-et-vient en fin de course. L'inconvénient est que tous les disques ne possèdent pas de sillon excentré.

c — *Arrêt par accélération.*

La spire finale avant le sillon circulaire a un très grand pas qui provoque une accélération du mouvement, utilisée pour actionner l'interrupteur. L'inconvénient est que le système fonctionne lorsqu'on déplace le bras à la main et il est difficile de placer la pointe de lecture à un endroit quelconque de l'enregistrement.

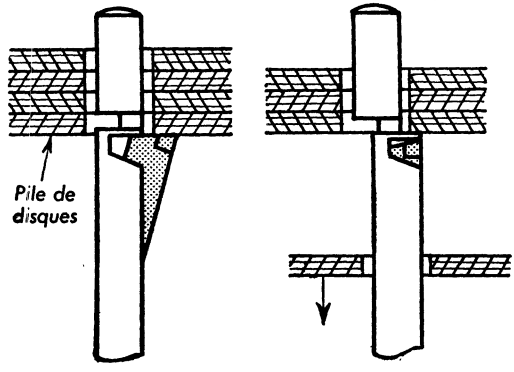


Fig. 8-21 et Fig. 8-22. — Changeur de disques.

5° Changeur de disques.

Il consiste à remplacer automatiquement un disque par le suivant d'une pile placée en attente sur la broche centrale. Le mécanisme est assez complexe et les systèmes adoptés par les constructeurs sont extrêmement variés. Nous indiquons seulement aux figures 8-21 et 22 les détails d'une broche changeuse Philips pour disques à petit trou. Le premier croquis correspond à la position d'attente, le deuxième à la position de descente.

II. LECTEURS MAGNÉTIQUES.

A - Généralités.

1° Définitions.

— *Tête magnétique d'enregistrement* : Transducteur électromagnétique transformant un courant électrique variable en un champ magnétique variable destiné à agir sur le milieu ferromagnétique d'enregistrement.

Il existe deux procédés principaux :

— L'enregistrement longitudinal dans lequel la direction principale du champ magnétique est parallèle à la direction du défilement de la branche

et l'enregistrement transversal dans lequel la direction principale du champ magnétique est perpendiculaire à la direction du défilement.

C'est le premier procédé qui est généralement utilisé car il permet des solutions mécaniques plus simples.

— *Tête magnétique de lecture* : Transducteur électromagnétique destiné à produire une force électromotrice variable sous l'effet du flux magnétique variable créé par le défilement du support magnétique.

— *Tête magnétique d'effacement* : Transducteur électromagnétique destiné à appliquer au support magnétique des champs alternatifs ou continus nécessaires à l'effacement de l'enregistrement.

— *Tête magnétique combinée* : Tête magnétique pouvant rassembler dans un même organe au moins deux des fonctions d'enregistrement de lecture ou d'effacement.

2° Caractéristiques.

a) Efficacité globale.

C'est le quotient de la force électromotrice dans la tête de lecture par le courant de modulation à basse fréquence dans la tête d'enregistrement.

b) Efficacité relative.

C'est le rapport de l'efficacité globale du système utilisant le support considéré, à l'efficacité globale du même système lorsque l'on utilise un support type dit « support de référence ».

c) Sensibilité relative.

C'est le rapport du courant circulant dans une tête d'enregistrement pour obtenir le niveau de travail du support de référence, au courant correspondant pour le support utilisé.

d) Perte pratique d'efficacité.

C'est le rapport exprimé en décibels de la valeur d'une grandeur mesurée à la sortie d'un organe d'un système d'enregistrement ou de lecture, à la valeur de cette même grandeur calculée à partir d'une théorie simple déterminée.

e) Fidélité.

C'est l'aptitude d'un lecteur (ou enregistreur magnétique) à se comporter de la même façon pour toutes les fréquences enregistrées sur le support. Elle est mise en valeur par la caractéristique de réponse.

B - Têtes magnétiques (fig. 8-23).

1° Circuit magnétique.

Il est constitué par un empilage de tôles à haute perméabilité (Mumétal, Permalloy) de forme circulaire ou rectangulaire. La nécessité de réaliser des entrefers très réduits (10 à 25 μ pour les têtes d'enregistrement et 5 à 10 μ

pour les têtes de lecture) amène à fractionner le circuit magnétique en deux tronçons séparés par des cales d'entrefer très précises en cuivre.

Bien que les ferrites (Ferroxcube, Fermalite) puissent être utilisés, la précision d'exécution limite leur emploi. Par contre leurs qualités (pertes magnétiques réduites, simplicité de montage) les imposent pour les têtes d'effacement.

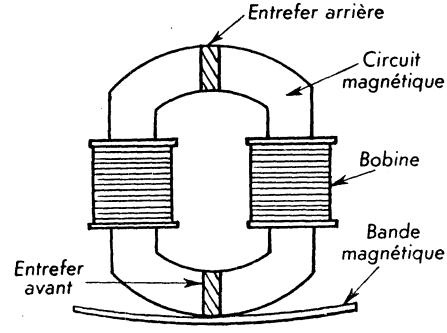


Fig. 8-23. — Tête magnétique.

2° Bobinages.

Ils sont généralement fractionnés en deux ou quatre bobines mises en série afin de réduire les ronflements (elles sont en parallèle vis-à-vis des champs extérieurs parasites et les champs créés s'annulent). On emploie du fil de cuivre de 0,005 mm de diamètre environ. Les bobines sont à haute impédance (2 500 Ω à 1 000 Hz) quelquefois à basse impédance sur appareils professionnels.

C - Magnétophones.

La disposition classique des éléments est représentée à la figure 8-24. Dans des modèles simples une seule tête magnétique peut servir à l'enregistrement et à la lecture.

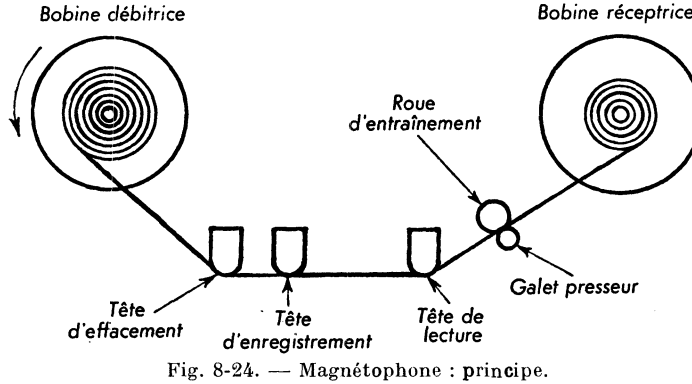


Fig. 8-24. — Magnétophone : principe.

Le système mécanique d'entraînement est plus ou moins complexe suivant les types et comporte un moteur (ou 3 moteurs dont deux servent au rebobinage rapide), un système inverseur de marche, un changement de vitesses, un frein, des commandes de marche et arrêt.

Pour éviter de travailler dans une partie courbe de la caractéristique magnétique du support et ramener le point de fonctionnement dans la partie droite on superpose au courant B.F. un courant porteur H.F. appelé courant de *polarisation magnétique* (1). Il en résulte que l'intensité du signal B.F. est accrue, la distorsion diminuée et le niveau de bruit de fond abaissé.

L'effacement est réalisé par une tête magnétique parcourue par un fort courant à fréquence élevée (50 kHz environ comme pour la polarisation magnétique).

III. LECTEURS OPTIQUES.

On utilise des cellules photo-électriques et le principe de lecture a été décrit au chapitre 2.

(1) Le terme « prémagnétisation » est à proscrire.

CHAPITRE 9

LES ANTENNES

I. GÉNÉRALITÉS.

A - Définitions.

Antenne : Conducteur ou ensemble de conducteurs électriques permettant le rayonnement (antenne d'émission) ou la captation (antenne de réception) des ondes électromagnétiques.

Ligne de transmission : Conducteur ou ensemble de conducteurs reliant l'émetteur ou le récepteur à l'antenne (appelée aussi feeder).

Adaptateur d'antenne : Dispositif électrique permettant de transmettre le maximum d'énergie entre l'émetteur et l'antenne ou entre l'antenne et le récepteur.

Antenne quart d'onde : Antenne accordée sur une longueur d'onde égale à quatre fois sa longueur.

Antenne demi-onde ou antenne doublet : Elle est accordée sur une longueur d'onde égale à deux fois sa longueur.

Antenne directive : Antenne dont on utilise les propriétés directives de façon à assurer l'émission ou la réception dans une direction déterminée.

Cadre : Antenne sensible à la composante magnétique du champ électromagnétique. Les cadres sont généralement orientables de façon à utiliser leurs propriétés directives.

Antenne fictive : Dispositif électrique substitué à l'antenne réelle mais ayant des caractéristiques analogues, utilisé pour les essais des émetteurs ou récepteurs.

B - Symbolisation — Norme NFC 03-390.

Fig. 9-1. Antenne : Symbole général.
Fig. 9-2. Antenne émettrice.
Fig. 9-3. Antenne réceptrice.

Fig. 9-4. Antenne doublet.
Fig. 9-5. Cadre : Symbole général.
Fig. 9-6. Cadre équilibré.

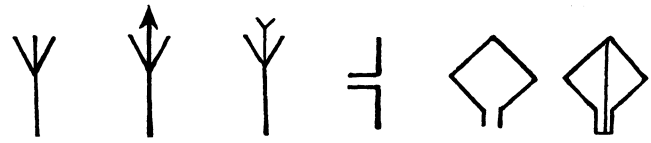


Fig. 9-1 à Fig. 9.6. — Antennes : symboles.

C - Rappel sur les ondes électromagnétiques.

1° Relation longueur d'onde, fréquence.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

λ : longueur d'onde.
f : fréquence.
c : vitesse de propagation des ondes électromagnétiques.

Dans le vide $C \approx 300\,000$ km/s $= 3 \times 10^8$ m/s.

2° Nomenclature des fréquences.

Appellation métrique recommandée des longueurs d'ondes	Abréviations françaises	Bande de fréquences	Abréviations anglo-saxones	Désignations françaises des fréquences
myriamétriques		< 30 kHz	L.V.F.	très basses
kilométriques	G.O. grandes ondes	30 à 300 kHz	V.F.	basses
hectométriques	P.O. petites ondes	300 à 3 000 kHz	M.F.	moyennes
décamétriques	O.C. ondes courtes	3 à 30 MHz	H.F.	hautes
métriques	O.T.C. très courtes	30 à 300 MHz	V.H.F.	très hautes
décimétriques		300 à 3 000 MHz	U.H.F.	ultra hautes
centimétriques		3 à 30 GHz	S.H.F.	supérieures
millimétriques		30 à 300 GHz	E.H.F.	extrêmement hautes

3° Champ électromagnétique.

Les ondes hertziennes utilisées en télécommunications couvrent une partie du spectre des ondes électromagnétiques.

Une onde électromagnétique peut être caractérisée par la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique en phase dont les directions sont constamment perpendiculaires à celle de la propagation (fig. 9-7).

Une onde est dite polarisée lorsque la direction des champs électrique et magnétique est constante.

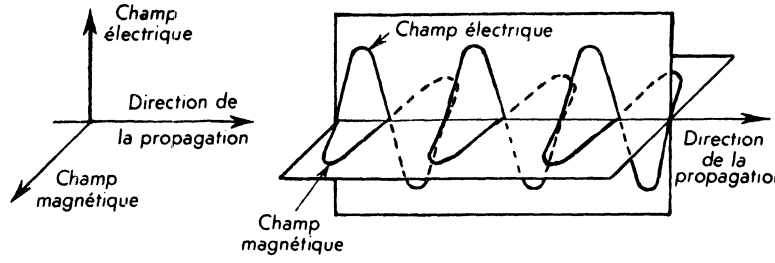


Fig. 9-7 et Fig. 9-8. — Propagation d'un champ électromagnétique.

Polarisation horizontale : Le plan de polarisation déterminé par la direction du vecteur champ électrique est horizontal.

Polarisation verticale : Le plan de polarisation est vertical (fig. 9-8).

Le plan de polarisation est déterminé par la forme et la disposition de l'antenne émettrice.

4° Propagation des ondes électromagnétiques.

L'antenne réceptrice reçoit, soit des ondes directes provenant de l'émetteur, soit des ondes réfléchies par les couches ionisées de la haute atmosphère appelée ionosphère.

La propagation de l'onde directe dépend du rapport entre la dimension des obstacles placés sur son trajet et la longueur d'onde. Les grandes ondes contournent les obstacles alors que les ondes courtes sont arrêtées par ces mêmes obstacles de dimensions comparables à leur longueur d'onde.

La propagation de l'onde indirecte dépend de la stabilité des couches ionisées. Nous allons rappeler l'influence de ces phénomènes sur chacune des bandes de fréquences transmises.

a) Ondes kilométriques (G.O.).

Elles contournent bien les obstacles par suite de la diffraction et l'onde directe se propage à de très grandes distances (fig. 9-9). Seule l'onde directe intervient et l'on a intérêt à augmenter l'énergie rayonnée par l'antenne émettrice dans le plan horizontal.

L'énergie reçue par l'antenne réceptrice étant inversement proportionnelle au carré de la distance, la puissance des émetteurs doit être importante pour obtenir de longues portées. (500 km environ)

b) Ondes hectométriques (P.O.).

L'onde directe est d'autant mieux absorbée par les obstacles terrestres que la longueur d'onde diminue. La portée de l'onde directe est de quelques centaines de kilomètres car au-delà elle est complètement absorbée par les obstacles. L'onde indirecte est absorbée le jour par une faible couche ionisée (couche D) et seule l'onde directe peut parvenir au récepteur.

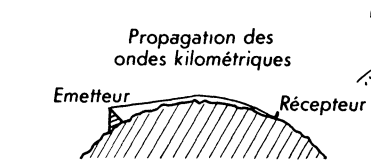


Fig. 9-9

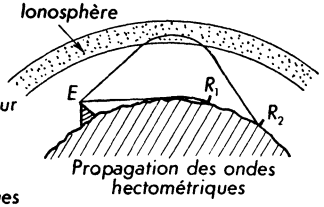


Fig. 9-10

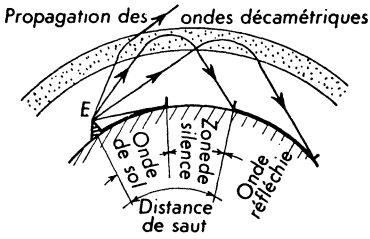


Fig. 9-11

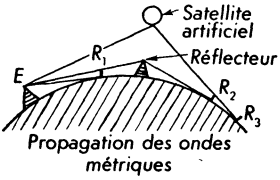


Fig. 9-12

Fig. 9-9 à 9-12. — Propagation des ondes.

La nuit les réflexions (en réalité réfractions successives) sur la couche ionisée *F* viennent renforcer l'onde directe et même deviennent prépondérantes à longue distance (fig. 9-10). La nuit on peut donc recevoir des stations inaudibles la journée. La portée est de 5 à 10 fois celle du jour mais la stabilité est souvent précaire.

c) Ondes décamétriques (O.C.).

L'onde directe étant rapidement absorbée par les obstacles terrestres c'est l'onde réfléchie qui présente le plus d'intérêt. La figure 9-11 montre *comment* se propagent les ondes en fonction de leur angle d'inclinaison. Une zone près de l'émetteur est touchée par l'onde de sol puis la zone éloignée par l'onde réfléchie. Une zone de silence existe pour laquelle les ondes forment avec la couche ionisée un angle trop important pour être réfléchies. On obtient une portée importante avec une puissance relativement faible.

La propagation des ondes décamétriques est donc liée étroitement à la présence et aux variations de la couche ionisée. En réalité l'ionosphère comprend le jour une couche sporadique *E* (altitude 100 à 110 km), une couche *F* durant la nuit (altitude 300 km) se dédoublant le jour en été en une couche F_1 (altitude 225 km) et une couche F_2 (altitude 320 km) et se limitant à la seule couche *F* en régime diurne hivernal (fig. 9-13 et 9-14).

Il en résulte que la propagation des ondes courtes dépend :

— des saisons,
— de l'heure,
— de leur longueur d'onde.

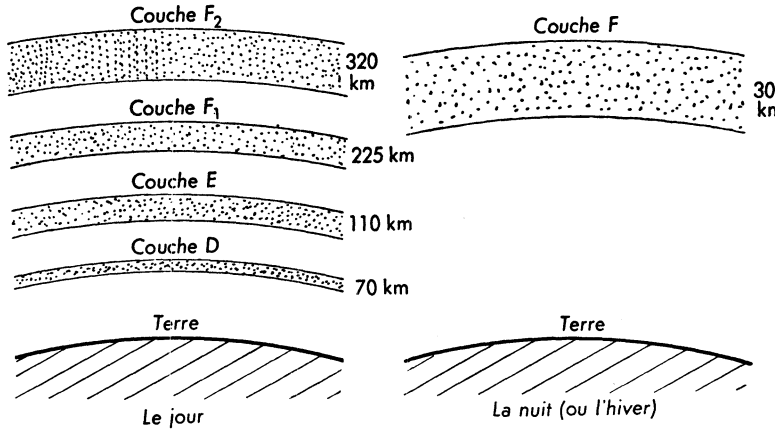


Fig. 9-13 et 9-14. — Ionosphère.

— De 60 à 100 mètres seule la propagation nocturne est intéressante. (Portée quelques milliers de km).

— De 40 à 50 mètres, propagation diurne de cent à quelques centaines de kilomètres s'étendant à plusieurs milliers de kilomètres la nuit.

— De 20 à 30 mètres la distance de saut s'allonge et la propagation est assez régulière aux différentes heures du jour ou de la nuit.

— Au-dessous de 20 mètres l'augmentation de l'angle de réfraction peut empêcher, à certaines heures et en période d'ionisation faible, l'onde d'être réfléchie vers la Terre.

d) Ondes métriques (O.T.C.).

Utilisées en télévision et en modulation de fréquence.

L'augmentation de l'angle de réfraction ne permet plus à l'ionosphère de renvoyer les ondes en direction de la Terre et seule la propagation par onde directe revêt un intérêt. La distance limite d au-dessus de laquelle la réception n'est plus possible est donnée par la formule :

$$d = 4{,}1\ (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

h_1 : hauteur de l'antenne émettrice au-dessus du sol (m),

h_2 : hauteur de l'antenne réceptrice au-dessus du sol (m).

Néanmoins ces ondes sont réfléchies par les obstacles dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde d'où l'utilisation d'obstacles artificiels pour augmenter la portée (réflecteurs; satellites artificiels) (fig. 9-12).

D - Caractéristiques des antennes.

1° Longueur d'antenne.

a) Longueur théorique.

Une antenne parfaitement isolée dans l'espace est accordée sur une fréquence f lorsque sa longueur est égale à la moitié de la longueur d'onde correspondante.

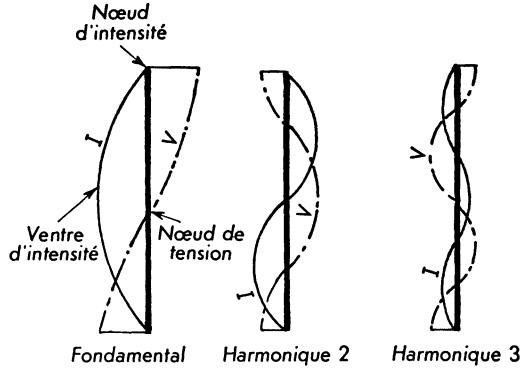


Fig. 9-15 à Fig. 9-17. — Antenne demi-onde.

Elle est le siège d'ondes stationnaires avec un ventre d'intensité au milieu et un nœud d'intensité à chaque extrémité (fig. 9-15). On l'appelle antenne demi-onde.

Une telle antenne peut entrer en résonance sur les harmoniques de la fréquence fondamentale mais avec un nœud d'intensité au milieu pour les harmoniques pairs (fig. 9-16) et un ventre d'intensité au milieu pour les harmoniques impairs (fig. 9-17).

Lorsqu'une antenne verticale est reliée à la terre, le sol agissant comme réflecteur, l'antenne entre en résonance pour une longueur d'onde égale à 4 fois sa longueur. On l'appelle *antenne quart d'onde.* Elle admet un ventre d'intensité à la base et un nœud d'intensité au sommet (fig. 9-18). Comme l'antenne demi-onde, elle entre en résonance sur les harmoniques.

b) Longueur réelle.

Elle doit être plus courte que la longueur théorique pour les deux raisons suivantes :

— La longueur théorique correspond à un diamètre de fil nul. Plus le diamètre d augmente, plus la surface du conducteur est grande d'où une

capacité en parallèle plus importante qui augmente la longueur réelle. Pour des valeurs de 1/2 *d* allant de 50 à 100 000 le facteur de raccourcissement va de 0,92 à 0,98.

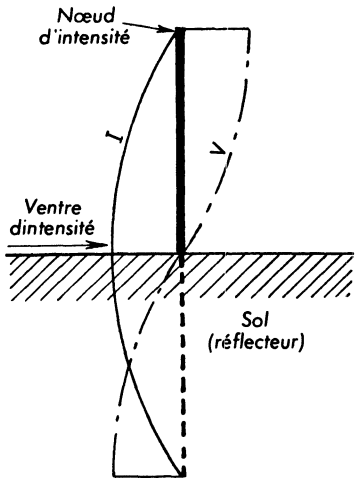


Fig. 9-18. — Antenne quart-d'onde.

— La longueur théorique correspond à une antenne parfaitement isolée dans l'espace et rectiligne. En réalité l'antenne est fixée par des isolateurs qui ne sont pas parfaits et si elle doit être de grande longueur elle est repliée en plusieurs brins ce qui provoque une augmentation des capacités en parallèle et la longueur réelle doit être environ de 5 % plus courte que la longueur théorique.

c) Hauteur efficace.

Pour diverses raisons (diminution de la hauteur, utilisation de propriétés directives...) une antenne verticale peut comporter un développement horizontal (fig. 9-19). Dans ce cas l'intensité au sommet n'est plus nulle et pour évaluer les performances, on utilise la notion de hauteur efficace. C'est la hauteur d'une antenne verticale théorique dont le sommet serait en A′ et qui donnerait en A la même valeur d'intensité que l'antenne réelle. On peut réduire la hauteur réelle d'une antenne verticale en la coupant par une inductance à la base ou par une capacité terminale.

2° Impédance d'entrée.

C'est la valeur de l'impédance que présente une antenne à ses bornes d'alimentation. Elle est composée d'une résistance appelée résistance de rayonnement et d'une réactance due à son inductance et à sa capacité.

Le terme réactif varie avec la fréquence et à la résonance, capacitance et inductance s'annulent, l'impédance devenant égale à la résistance de rayonnement.

L'impédance varie en chaque point de l'antenne, la valeur minimale se trouvant au ventre d'intensité (quelques dizaines d'ohms) et la valeur maximale aux nœuds d'intensité (quelques milliers d'ohms).

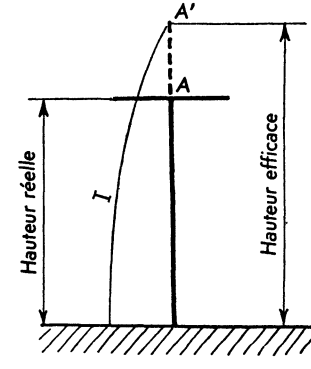


Fig. 9-19

Si l'alimentation se fait à un ventre d'intensité on a une alimentation en intensité (ou à basse impédance). Si elle se fait à un nœud d'intensité on a une alimentation en tension (ou à haute impédance).

3° Résistance de rayonnement.

a) Définitions.

Pour une antenne d'émission, c'est la résistance relative à la dissipation d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique (1). Pour une antenne réceptrice elle est égale à la valeur de l'impédance à la résonance.

En haute fréquence elle est nettement plus importante que la résistance ohmique relative à la dissipation d'énergie calorifique.

Pour une antenne demi-onde isolée dans l'espace, la résistance de rayonnement pour un fil infiniment fin est de 73 ohms alors que la résistance réelle n'excède pas 0,1 à 0,2 ohm.

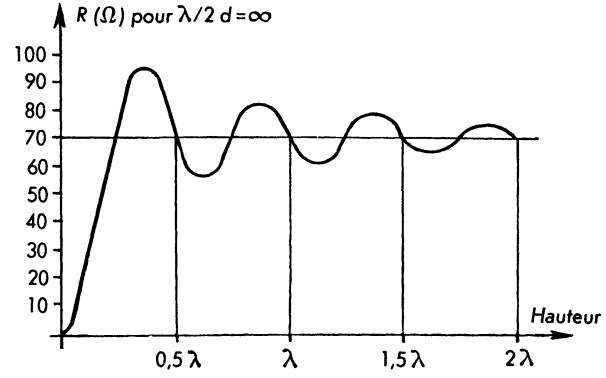


Fig. 9-20. — Résistance de rayonnement d'une antenne horizontale en fonction de la hauteur.

b) Variations de la résistance de rayonnement.

L'antenne réelle ne pouvant pas toujours être considérée comme isolée dans l'espace ni constituée d'un fil infiniment fin, sa valeur va dépendre de sa hauteur par rapport au sol, de son diamètre et de sa longueur.

— *Influence du sol* : Nous avons vu qu'il agit comme réflecteur et l'onde H.F. réfléchie peut tomber en phase ou en opposition de phase avec l'onde directe suivant la hauteur de l'antenne par rapport au sol. Le rayonnement peut être ainsi renforcé ou diminué et la résistance de rayonnement en fonction de la hauteur passe par des valeurs maximales ou minimales de part et d'autre de la valeur moyenne (fig. 9-20).

Cet effet peut être négligé pour :

- une antenne verticale,
- une antenne horizontale placée à une hauteur supérieure à 3 longueurs d'onde.

(1) La valeur de la résistance de rayonnement R_0 exprimée en ohms est donnée pour un ventre d'intensité. $R_0 = P/I_0^2$, P étant la puissance rayonnée et I_0 l'intensité au ventre d'intensité.

— *Influence du diamètre.*

La résistance de rayonnement diminue avec le rapport 1/2 *d* (*d* : diamètre du fil). La courbe de résonance de l'antenne est d'autant plus pointue (sélectivité plus grande) que 1/2 *d* est grand ou le diamètre du fil plus petit.

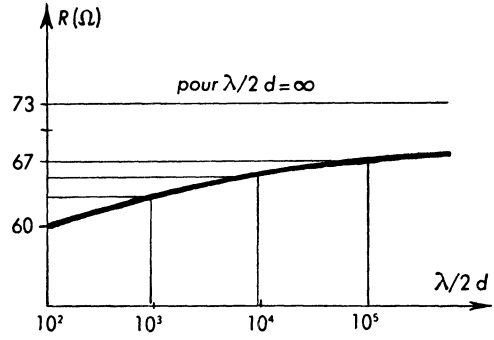


Fig. 9-21. — Résistance de rayonnement en fonction du diamètre.

Pour l'utilisation d'une antenne sur une certaine plage de fréquences la courbe de résonance doit être plus étalée d'où l'emploi de fil de gros diamètre.

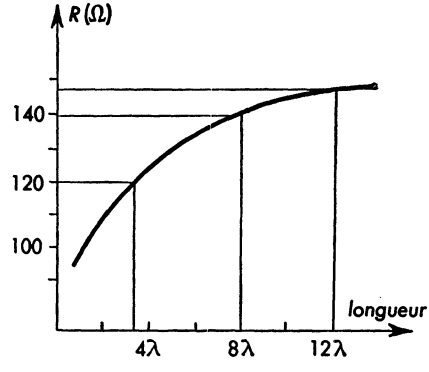


Fig. 9-22. — Résistance de rayonnement en fonction de la longueur.

La variation de la résistance de rayonnement en fonction de λ/2 *d*, pour une antenne demi-onde isolée dans l'espace est donnée à la figure 9-21.

— *Influence de la longueur.*

La variation de la résistance de rayonnement en fonction de la longueur est indiquée à la figure 9-22. On en déduit que la résistance de rayonnement sera plus grande sur les harmoniques que sur la fondamentale.

4° Rendement d'une antenne.

Le courant en chaque point de l'antenne ayant une valeur différente le calcul intégral permet de montrer que l'énergie dissipée en chaleur est $W_r = 1/2\ r\ I^2$ (watts),

r : résistance du fil en Ω,

I : intensité à un ventre d'intensité en A.

L'énergie rayonnée a pour valeur $W_R = R\ I^2$ (en watts).

R : résistance de rayonnement.

Le rendement a pour valeur :

$$\eta = \frac{W_R}{W_R + W_r} = \frac{1}{1 + r/2\,R}.$$

Le rendement sera donc d'autant plus grand que le rapport $r/2\,R$ sera plus faible, c'est-à-dire que les pertes seront plus petites (voir 9°).

5° Polarisation.

Nous avons vu qu'elle est définie par la direction du champ électrique par rapport à la terre.

A courte distance de l'émetteur, l'antenne de réception doit avoir même position que l'antenne émettrice.

A longue distance les réflexions sur l'ionosphère font tourner le plan de polarisation et la position de l'antenne réceptrice est indifférente.

Néanmoins la polarisation horizontale est plus favorable car elle capte moins les parasites locaux.

Choix du type de polarisation.

— Polarisation horizontale. Le sol constitue un réflecteur parfait pour les ondes polarisées horizontalement ce qui n'est pas le cas pour les ondes polarisées verticalement.

Pour les liaisons avec avions on évite le cône de silence au-dessus de l'antenne verticale par l'utilisation de la polarisation horizontale. En ondes courtes elle permet d'avoir un rayonnement important aux angles de site élevés.

— Polarisation verticale. En ondes kilométriques l'onde de sol étant la seule importante la polarisation verticale s'impose. La commodité d'installation d'antennes omnidirectionnelles et d'antennes goniométriques la font utiliser en ondes métriques (1).

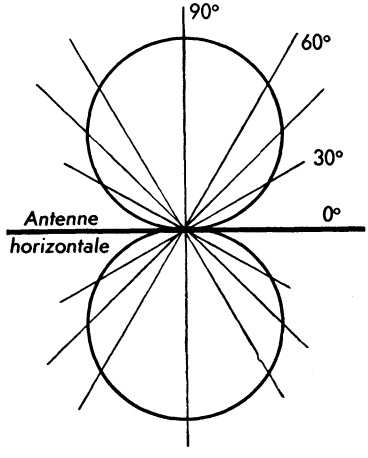


Fig. 9-23. — Diagramme directionnel dans le plan horizontal.

6° Diagramme directionnel.

Le rayonnement d'une antenne émettrice n'est pas uniforme dans toutes les directions. Si on porte sur chaque direction l'intensité du champ rayonné, on obtient un diagramme directionnel. Ce diagramme est généralement coupé par des plans horizontaux ou verticaux pour la commodité du tracé.

La figure 9-23 montre le diagramme obtenu dans un plan horizontal pour une antenne demi-onde.

A la réception on obtient un diagramme directionnel en portant la sensibilité de l'antenne sur les différentes directions.

(1) Des types de polarisations particuliers, telle que la polarisation circulaire peuvent être utilisés dans certains cas.

7° Gain d'une antenne.

Le gain d'une antenne est le rapport entre le champ créé dans la direction privilégiée et celui que donnerait une antenne de référence alimentée à puissance égale et donnant un rayonnement omnidirectionnel.

8° Bande passante.

C'est la bande de fréquence comprise entre les deux fréquences limites pour lesquelles l'affaiblissement est de 3 dB.

9° Pertes dans les antennes.

a) Pertes par effet pelliculaire.

Elles sont dues au fait que les courants H.F. ne circulent qu'en surface des conducteurs. La résistance en H.F. est beaucoup plus élevée qu'en courant continu et provoque ainsi une augmentation de la puissance perdue par effet Joule.

Néanmoins le calcul montre que pour les antennes unifilaires dont la résistance de rayonnement est grande, les pertes par effet Joule sont négligeables (1 % environ de la puissance d'alimentation). Du fil plein de 1 à 2 mm de diamètre peut être ainsi utilisé.

Pour les ondes ultra-courtes l'utilisation de fil plein ne donnerait plus des pertes négligeables et il y a lieu d'employer dans ce cas du tube de gros diamètre (1 à plusieurs centimètres suivant les fréquences).

b) Pertes par défaut d'isolement.

Elles sont dues aux courants de fuite à travers les résistances d'isolement. C'est aux ventres de tension c'est-à-dire aux extrémités de l'antenne qu'elles seront les plus importantes. Pour les antennes supportées à ces extrémités il faudra soigner particulièrement l'isolement (isolateurs de qualité). Dans le cas d'antennes rigides ces extrémités sont dans l'air et les pertes sont supprimées.

E - Alimentation des antennes.

1° Alimentation par ligne résonnante.

Une ligne est constituée par un ou deux conducteurs reliant l'émetteur (ou le récepteur) à l'antenne. Elle est dite résonnante si son impédance caractéristique est différente de l'impédance sur laquelle elle se termine. Par suite du taux élevé d'ondes stationnaires existant dans ce genre de lignes, le diélectrique air est à préférer pour réduire les pertes et de ce fait avoir une haute impédance caractéristique.

Une ligne résonnante employée pour alimenter une antenne devra avoir une longueur électrique égale à un multiple entier de $\lambda/4$, les connexions se faisant soit à une extrémité (ventre de tension) soit au centre de l'antenne (ventre d'intensité).

Malgré ses défauts ce type d'alimentation est souvent utilisé avec des antennes simples à cause de sa simplicité de réglage et de sa souplesse d'utilisation par rapport à la gamme d'ondes sur laquelle l'antenne peut fonctionner.

2° Alimentation par ligne à ondes progressives.

C'est celle qui dans tous les cas est à préférer car elle n'est en principe le siège d'aucune onde stationnaire et l'énergie transmise est complètement absorbée à l'extrémité.

Ce type d'alimentation est obtenu si l'impédance caractéristique de la ligne est la même que les impédances sur laquelle elle se termine. Lorsque l'impédance de l'antenne aux points de connexions est différente de celle de la ligne, il faut employer un dispositif dit « adaptateur d'impédances » permettant de recueillir ainsi le maximum d'énergie à l'extrémité.

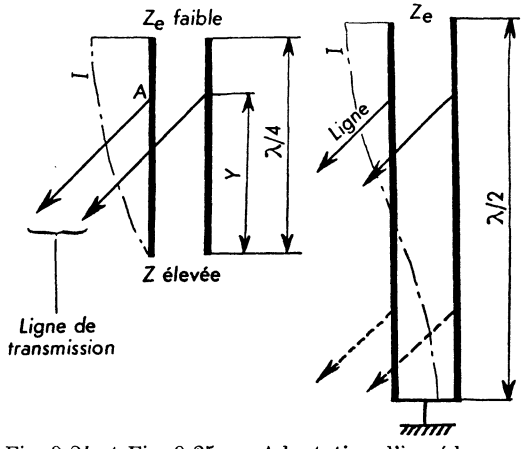


Fig. 9-24 et Fig. 9-25. — Adaptation d'impédances.

F - Adaptation d'impédances.

1° Adaptation par ligne quart d'onde.

Une ligne quart d'onde (fig. 9-24) possède les propriétés suivantes :

a) — Les courants instantanés dans les deux fils parallèles circulent en sens inverse et en conséquence les champs produits par chacun d'eux sont en opposition de phase et s'annulent réciproquement. Une ligne quart d'onde ne rayonne donc pratiquement pas.

b) — L'impédance de la ligne quart d'onde varie d'une extrémité à l'autre et la connexion de la ligne de transmission se fait en un point *A* dont l'impédance est égale à l'impédance caractéristique de cette ligne. La portion *Y* de la ligne quart d'onde s'appelle « Stub » ou « ligne de correction ».

c) — La longueur réelle d'une ligne quart d'onde est différente de sa longueur électrique lorsque l'isolant n'est pas l'air ou si les conducteurs sont trop rapprochés. Dans ces cas la vitesse de propagation des ondes H.F. est plus faible et la longueur réelle doit être plus faible que la longueur théorique. On tient compte d'un « facteur de vélocité ». Par exemple si le

facteur de vélocité d'un câble coaxial est $k = 0{,}66$, une ligne quart d'onde de longueur électrique de 10 mètres devra avoir 6,6 m de longueur réelle.

d) — Une ligne quart d'onde fermée possède à son extrémité fermée un nœud de tension pouvant être relié à la masse. On utilise cette propriété pour réaliser en U.H.F. des supports isolants en cuivre.

e) — La section d'adaptation aura une longueur électrique d'un quart d'onde si elle est ouverte (fig. 9-24) et d'une demi-onde si elle est fermée (fig. 9-25). Les points de connexions seront recherchés en fonction de l'impédance caractéristique de la ligne à adapter.

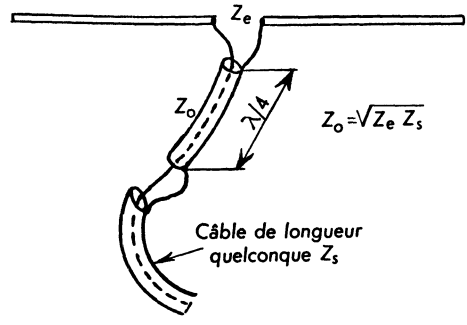


Fig. 9-26. — Adaptation d'impédances par ligne quart d'onde.

f) — Une ligne quart d'onde peut être utilisée avec connexion en extrémité (fig. 9-26) à condition que son impédance caractéristique soit la moyenne géométrique des deux impédances à adapter

$$Z_0 = \sqrt{Z_e \cdot Z_s}$$

Z_0 : impédance caractéristique de la ligne 1/4 d'onde,
Z_e : impédance à l'entrée,
Z_s : impédance à la sortie.

2° Adaptation en « delta ».

La section d'adaptation est constituée par le prolongement des conducteurs de la ligne à haute impédance, inclinés pour présenter une augmentation graduelle d'impédance de façon à l'amener à la même valeur que l'impédance présentée par l'antenne aux points de connexions (fig. 9-27). Ce système est souvent utilisé avec les lignes 600 Ω.

3° Adaptation en T.

Ce système est dérivé du précédent (fig. 9-28). L'espace réduit entre antenne et « T » d'adaptation donne un rayonnement négligeable par rapport au précédent. On utilise un adaptateur formé de tubes monté sur des barrettes permettant par déplacement des tubes l'obtention du réglage optimum.

4° Adaptation par trombone.

L'emploi d'un trombone de diamètre constant (fig. 9-29) constitue un adaptateur d'impédances dont le rapport de transformation est 4. Il permet par exemple l'adaptation d'un câble coaxial 75 Ω à une impédance d'antenne de 19 Ω.

Fig. 9-27 Fig. 9-28 Fig. 9-29

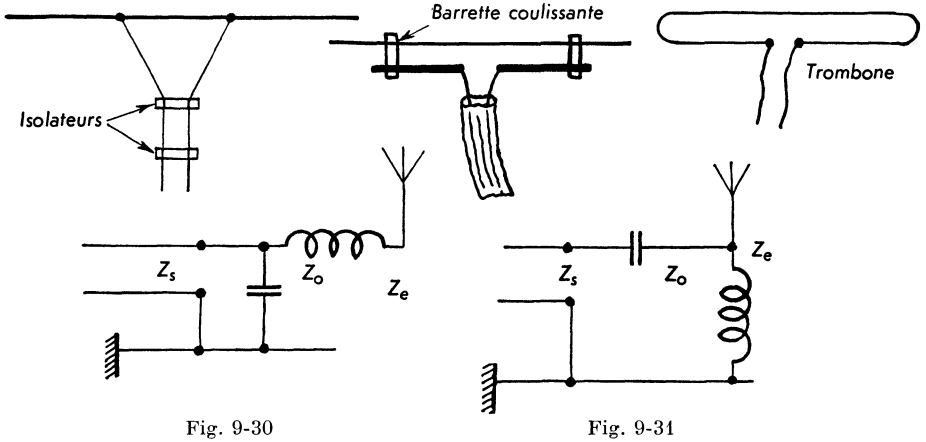


Fig. 9-30 Fig. 9-31

Fig. 9-27 à Fig. 9-31. — Adaptation d'antennes.

Le rapport de transformation est modifié si le trombone est réalisé avec des tubes de diamètres différents (voir page 339).

5° Adaptation par réactances.

Elle est utilisée en émission sur ondes hectométriques (ou kilométriques) les réactances Z_0 étant déterminées en conséquence (fig. 9-30 et 9-31).

G - Classification des antennes.

1° D'après le sens de transformation de l'énergie.

— Antennes d'émission.
— Antennes de réception.

2° D'après le genre d'installation.

— Antennes fixes : extérieures, intérieures.

3° D'après la longueur d'onde.

— Antennes pour ondes kilométriques, hectométriques, décamétriques, etc.

4° D'après leur longueur.

— Antennes quart d'onde, demi-onde, à onde entière, etc.

5° D'après leur forme.

— Antennes unifilaire, bifilaire, en nappe, doublet, à fente, cadre, etc.

II. ANTENNES DE RÉCEPTION.

A - Antennes pour radiorécepteurs fixes.

Nous n'examinerons ici que les antennes non directives ou peu directives employées pour la réception en modulation d'amplitude. Elles doivent recevoir de larges bandes de fréquences et ne sont pas accordées. Elles sont le siège d'ondes progressives et leur efficacité est faible.

1° Antennes d'appartement.

Lorsque les conditions locales ne permettent pas l'installation d'une antenne extérieure dont la pose implique la connaissance de quelques règles élémentaires si l'on veut obtenir un résultat acceptable. On peut obtenir de bons résultats lorsque le niveau des parasites est faible, à la campagne par exemple. Leur hauteur efficace est de 0,4 m environ.

a) Constitution.

Fil de cuivre de 0,6 mm environ nu ou émaillé, boudin extensible, ruban tressé de longueur suffisante.

b) Installation.

L'antenne doit être bien tendue, fixée aux extrémités par l'intermédiaire d'isolateurs. Aucun point de l'antenne ne doit être situé à moins de 10 cm des murs ou du plafond.

c) Précautions.

L'antenne ne doit pas être parallèle à des canalisations d'eau ou de gaz pouvant former écran et absorber une partie de l'énergie H.F. ou être parallèle à des conducteurs électriques qui pourraient amener des parasites supplémentaires. Si l'immeuble comporte des armatures métalliques (béton armé) il est préférable de tendre l'antenne au-dessus d'une fenêtre en bois. Dans le cas de menuiseries métalliques une antenne de balcon donnera de meilleurs résultats. Le fil de descente sera soudé à l'antenne.

Il est interdit par l'E.D.F. et les P. et T. d'utiliser un fil de secteur ou une ligne téléphonique en guise d'antenne (même avec interposition d'un condensateur). Le gaz de France interdit également d'utiliser un tuyau de gaz comme fil de terre.

2° Antennes extérieures.

Une bonne antenne extérieure doit capter le maximum d'énergie H.F., recevoir le moins possible de parasites et dans le cas de trafic amateur avoir des propriétés directives en ondes courtes.

a) Conditions d'installation.

— Elle doit être bien dégagée en l'éloignant à 3 mètres au moins des murs, toits, masses métalliques, arbres, etc.

— Elle doit être assez élevée au-dessus de la zone des perturbations parasites (6 à 10 mètres au-dessus du sol). La descente sera blindée si nécessaire.

— Sa longueur doit être suffisante (10 à 20 mètres pour une antenne unifilaire).

— L'isolation aux points d'attache doit être parfaite.

— Elle doit avoir une bonne conductibilité H.F.

— On ne la placera jamais parallèlement à des lignes électriques (surtout lignes H.T.).

— Suivant les utilisations elle sera unidirectionnelle ou omnidirectionnelle.

— L'installation sera complétée par une bonne prise de terre et accessoirement par un parafoudre.

b) Eléments constitutifs.

— *Collecteur d'onde* : C'est généralement un conducteur ou un ensemble de conducteurs en cuivre écroui, en bronze phosphoreux ou en aluminium (diamètre 1,2 à 2 mm).

Les courants H.F. circulant en surface par effet pelliculaire on a intérêt à utiliser du fil émaillé évitant ainsi l'oxydation. Le fil étamé est à éviter car sa conductibilité superficielle est moins élevée. On peut aussi utiliser du câble à brins multiples isolés (10 à 12 brins). Sa hauteur efficace est de l'ordre du mètre.

— *Descente* : Le fil de descente d'antenne peut être nu ou blindé. Dans le premier cas il doit être fixé en différents points par des isolateurs appropriés. Le deuxième cas préférable nécessite l'emploi d'un fil blindé de bonne qualité (grande résistance d'isolement, faible capacité entre conducteur central et gaine métallique, résistance aux intempéries et au vieillissement). La gaine métallique doit être réunie à une prise de terre autant que possible indépendante de celle du récepteur. Le conducteur central est réuni à l'antenne par épissure et soudure. Une descente blindée convenablement installée est insensible aux parasites. Le fil de descente doit être suffisamment écarté des murs.

— *Isolateurs* : Ils ont pour but d'isoler le collecteur d'onde des points d'attache. Les figures 9-32 à 9-34 montrent différents modèles utilisés. Le premier en Pyrex offre une ligne de fuite plus grande que les deux suivants

en porcelaine qui sont par contre plus résistants car ils travaillent en compression. Ils n'entraînent pas la chute de l'antenne en cas de rupture. Il y a intérêt à placer plusieurs isolateurs à chaque extrémité.

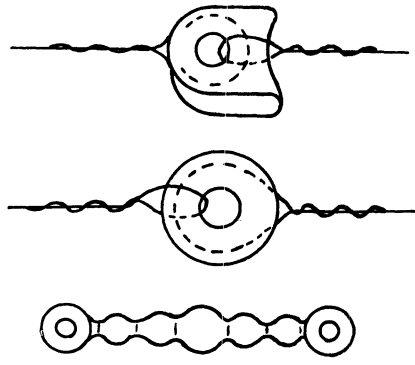


Fig. 9-32 à Fig. 9-34
Isolateurs en porcelaine.

— *Protection contre la pluie* : La pluie ayant tendance à couler le long du fil de descente il faut ménager un égouttoir, ou un coude du fil ou un disque métallique soudé pour éviter sa progression (fig. 9-35 et 36). Le passage à travers le mur se fait au moyen d'un isolateur ou d'une pipe en porcelaine (fig. 9-37 et 38) ou encore on passe le fil à travers un trou pratiqué dans le dormant d'une fenêtre ou d'une porte.

Lorsqu'on utilise un fil blindé on a intérêt à utiliser un raccord étanche à sa jonction au collecteur d'onde afin d'éviter l'humidité de pénétrer.

— *Protection contre la foudre* : Lorsque l'antenne est assez haute et dégagée elle peut acquérir des charges assez fortes ou être touchée directement

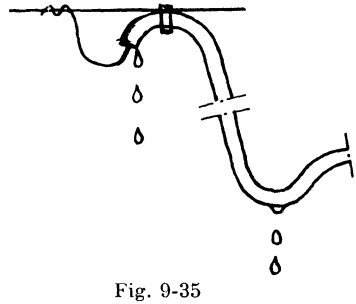


Fig. 9-35

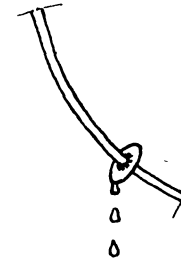


Fig. 9-36

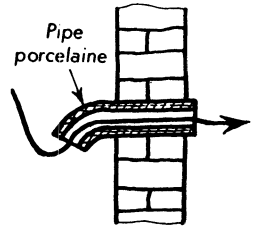


Fig. 9-37

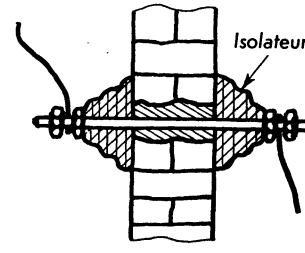


Fig. 9-38

par la foudre. Afin de protéger le récepteur on emploie des dispositifs de mise à la terre de l'antenne soit manuellement (inverseur antenne-terre) soit

automatiquement (limiteurs de tension par tube au néon ou résistance V.D.R., parafoudre à peignes).

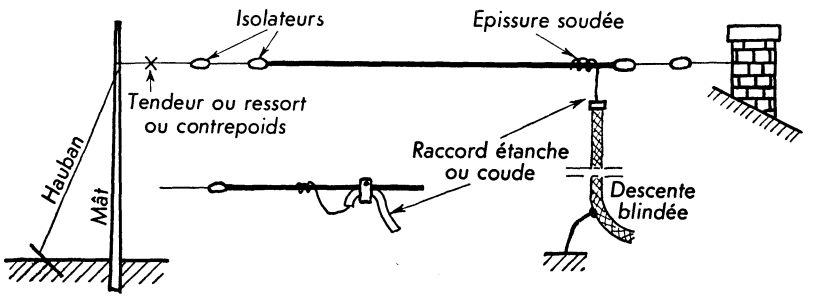


Fig. 9-39.

c) Différents types (fig. 9-39).

Les principaux types sont les suivants :

— *Antenne en* T : C'est une antenne unifilaire. La descente se fait au milieu à un ventre d'intensité. La direction favorisée à l'émission comme à la réception est indiquée par la flèche (fig. 9-40).

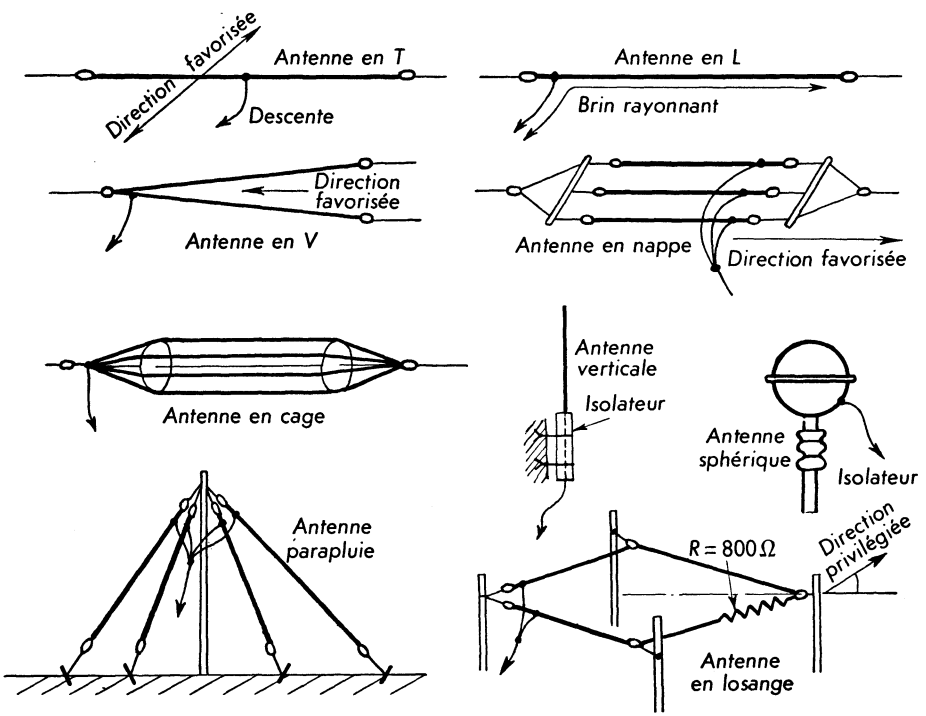


Fig. 9-40 à Fig. 9-48.

— *Antenne en* L : La descente est connectée à un ventre de tension. La direction favorisée est celle indiquée par la flèche. Ces deux types d'antennes sont relativement faciles à installer (fig. 9-41).

— *Antenne en* V : C'est une antenne bifilaire utilisée lorsque la longueur d'un brin unique ne permet pas son installation. La direction favorisée est située sur la bissectrice des deux brins (fig. 9-42).

— *Antenne en nappe* : Employée lorsque l'encombrement doit être plus réduit que dans le cas précédent. Les brins parallèles sont isolés les uns des autres à une extrémité. L'écartement des brins doit être supérieur à 1/20 de la distance au sol (fig. 9-43).

— *Antenne en cage* : Constituée par 4 à 8 conducteurs tendus sur des cerceaux métalliques appropriés, cette disposition permet de réduire les pertes en H.F. (fig. 9-44).

— *Antenne verticale* : C'est l'antenne idéale car elle est beaucoup moins soumise aux champs parasites si elle est de hauteur suffisante. Le champ électrique des parasites lui est généralement perpendiculaire et l'influence peu. Une grande antenne verticale doit être légère et solidement haubannée. Elle peut être constituée plus simplement par un simple mât rigide fixé sur un socle fortement isolé (fig. 9-45) ou par un fil tendu le long d'une perche en bambou. Les antennes verticales sont omnidirectionnelles.

— *Antenne parapluie* : C'est une variante de l'antenne verticale permettant d'augmenter la surface active lorsque l'installation d'une grande antenne verticale est trop onéreuse ou délicate (fig. 9-46).

— *Antenne sphérique* : La faible hauteur est compensée en partie par l'augmentation de la capacité terminale. Elle est constituée par une boule creuse en aluminium fixée sur un bambou ou par l'intermédiaire d'un isolateur en porcelaine (fig. 9-46).

— *Antennes en losange* : Leur installation est compliquée mais elles sont très directives. La résistance de 800 Ω a pour but d'éviter la formation d'ondes stationnaires dans l'antenne et de lui permettre de recevoir une bande de fréquences assez large (fig. 9-48).

— *Remarque* : Toutes ces antennes ont comme image la terre. Le sol doit donc être conducteur sinon il faut installer un réseau de fils conducteurs enterré, assez étendu et appelé contrepoids.

B - Antennes pour installations mobiles.

1° Antennes pour postes portatifs.

Le faible développement possible de l'antenne ne permet son efficacité que sur ondes décamétriques et surtout métriques (émetteurs-récepteurs militaires ou de chantiers). On utilise des antennes télescopiques.

L'emploi de cadres à haute impédance incorporés, permet la réception en ondes hectométriques et kilométriques sur postes portatifs à transistors.

2° Antennes pour véhicules automobiles.

Pour la réception en ondes courtes on utilise une antenne de longueur fixe ou une antenne télescopique fixée sur une aile ou dans l'axe du véhicule en arrière du pare-brise. Elle peut être montée sur une rotule. La traversée de la carrosserie doit être bien isolée.

Les émetteurs-récepteurs professionnels utilisent une antenne 1/4 d'onde en ondes métriques. C'est une antenne « fouet » constituée par une mince tige métallique fixée dans l'axe du véhicule un peu en arrière du pare-brise et inclinée vers l'arrière. Cette disposition donne un diagramme sensiblement omnidirectionnel.

3° Antennes sur avions.

Elles sont très diverses en fonction de la gamme d'onde utilisée et du type d'avions (lents ou rapides).

a) Ondes hectométriques.

L'émission ou la réception se fait au moyen d'une antenne pendante déroulée d'une centaine de mètres au moyen d'un rouet à travers une canne creuse.

b) Ondes décamétriques.

On utilise une antenne fixe en L inversé. La partie verticale, de quelques décimètres, est sensible à la composante verticale du champ et la partie horizontale formant capacité avec la cellule de l'avion est sensible à la composante horizontale. Le rayonnement est nul dans l'axe de l'avion. L'antenne peut aussi être incorporée dans l'aile de l'avion.

c) Ondes métriques.

La forme la plus courante est l'antenne sabre profilée. En polarisation verticale elle est utilisée pour les radiocommunications, la goniométrie de sol et en polarisation horizontale pour la navigation (radiophares V.O.R. et I.L.S. d'atterrissage).

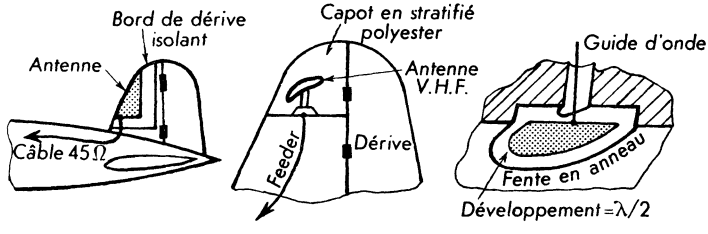


Fig. 9-49 à Fig. 9-51. — Antennes pour avions rapides.

d) Ondes décimétriques.

Ce sont des antennes 1/2 onde alimentées par le milieu ou des antennes Yagi pour radars de type ancien, sondeurs altimétriques ou balises radioélectriques.

e) Antennes pour avions rapides ($v > 700$ km/h).

Les antennes saillantes n'étant plus acceptables, elles sont constituées par une partie de l'avion isolée électriquement telle que bout d'aile ou bord de dérive (fig. 9-49) ou une antenne V.H.F. placée sous un capot en polyester (fig. 9-50).

En ondes centimétriques on emploie des antennes à fentes placées sous le fuselage ou sous les plans. C'est généralement une antenne à fente annulaire (fig. 9-51).

C - Antennes pour télévision et modulation de fréquences (ondes métriques) (1).

1° Caractéristiques.

a) Longueur d'antenne.

Les faibles longueurs d'ondes utilisées permettent d'avoir des antennes demi-onde accordées.

Les trois bandes de fréquences utilisées actuellement sont :

Bande I 41 à 68 MHz (télévision).
Bande II 87,5 à 100 MHz (modulation de fréquence).
Bande III 163 à 216 MHz (télévision).

Les longueurs d'ondes correspondantes étant comprises entre 1,4 et 7 mètres, le développement des antennes sera de l'ordre du mètre. Elles pourront donc être rigides et d'installation facile.

b) Polarisation.

Elle est soit horizontale, soit verticale. Le dipôle droit ou replié étant le type d'antenne le plus utilisé il sera placé dans le plan de polarisation défini par l'émetteur.

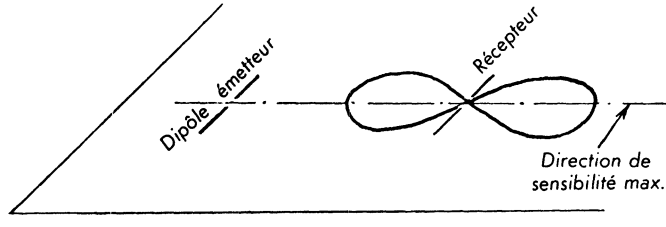


Fig. 9-52. — Diagramme directionnel d'une antenne doublée.

c) Directivité.

Le diagramme de directivité d'un dipôle montre qu'il recueille le maximum d'énergie dans la direction qui lui est perpendiculaire. Il sera donc

(1) Ces antennes sont valables pour l'émission ou la réception radio-électriques sur ondes métriques.

placé perpendiculairement à la direction joignant l'émetteur et le récepteur (fig. 9-52).

On définit l'angle de directivité comme étant celui pour lequel la rotation de l'antenne provoque une atténuation de moitié de la puissance recueillie soit un affaiblissement de 3 dB (ou 0,707 fois la tension ou l'intensité maximale).

Nous verrons plus loin comment on peut augmenter la directivité au moyen d'éléments parasites.

d) Bande passante.

En modulation de fréquence la bande passante est assez faible (20 kHz) mais en télévision l'antenne doit avoir une bande passante d'au moins 14 MHz à plus ou moins 1,5 dB. L'antenne est accordée sur le milieu de la bande. L'augmentation de la bande passante peut être obtenue soit en diminuant le facteur de qualité de l'antenne, soit en augmentant le diamètre des conducteurs, soit en modifiant les longueurs des éléments parasites. L'élargissement de la bande se traduit par une baisse du gain.

e) Impédance.

Les antennes pour ondes métriques étant accordées, l'impédance est égale pratiquement à la résistance de rayonnement. Elle doit rester constante dans la bande de fréquences considérée.

Les impédances standardisées sont : 300 Ω en modulation de fréquence et 75 Ω en télévision. L'impédance de 75 Ω s'est généralisée car elle permet une adaptation plus facile à la ligne de transmission avec des pertes faibles.

f) Gain.

Le gain des antennes utilisées est le rapport entre le champ créé par l'antenne considérée et celui de l'antenne doublet type considérée comme référence et à laquelle on attribue un gain égal à l'unité.

2° Différents modèles.

a) Antenne doublet.

Lorsque l'antenne est accordée en demi-onde, on peut prélever l'énergie en son milieu au ventre d'intensité. Elle présente en ce point une impédance de 75 Ω environ. Elle est connectée à une ligne présentant une impédance caractéristique de même valeur.

Le diagramme directionnel est formé dans le plan horizontal de deux lobes, un à l'avant et un à l'arrière (fig. 9-52).

Cette antenne est prise comme référence pour évaluer le gain des autres modèles d'antenne.

La longueur théorique d'une telle antenne est donnée par la formule $c = \lambda f$ ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Pour une antenne demi-onde et f exprimée

en MHz la longueur théorique en mètres est $L = 150/f$. Nous avons vu que la longueur réelle doit être inférieure à 5 % ce qui donne

$$\boxed{L = \frac{143}{f}} \quad (f \text{ en MHz}).$$

b) Antenne repliée ou trombone (folded).

La figure 9-53 montre la disposition d'une telle antenne. L'intensité points A, B est moitié de celle d'un doublet simple.

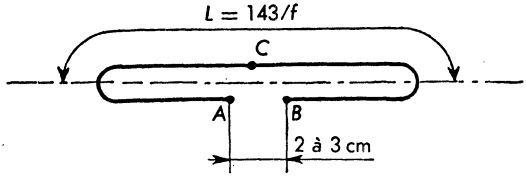


Fig. 9-53. — Antenne repliée.

Pour une même puissance on peut écrire :

$$W = \underbrace{Z_1 \, I^2}_{\text{doublet}} = \underbrace{Z_2 \, (I/2)^2}_{\text{trombone}}$$

On en déduit $Z_2 = 4 \, Z_1$.

L'antenne repliée peut donc être utilisée comme transformateur d'impédance de rapport 4. (Valeur obtenue pour un tube de diamètre constant).

Le trombone a d'autre part l'avantage de permettre une fixation mécanique simple au point C (nœud de tension) ne demandant aucun isolement. Il sera fixé en ce point directement sur le mât support. La figure 9-54 montre la disposition des éléments d'une antenne simple.

c) Antennes Yagi ou à éléments parasites.

— *Action d'un élément parasite.*

Si l'on place un brin demi-onde à une distance quart d'onde (0,25 λ) il est excité par induction par le doublet. L'onde réémise par ce brin parasite retombe en phase avec celle captée ou émise par le doublet et va donc provoquer un renforcement, c'est-à-dire une augmentation du gain dans la direction considérée.

— *Fonctionnement en directeur ou en réflecteur.*

On constate qu'en faisant varier la distance entre le brin parasite et le doublet le rayonnement du brin parasite n'est pas symétrique.

Entre 0,15 λ et 0,25 λ, c'est la direction parasite-doublet qui est avantagée. On dit qu'il fonctionne en « directeur ».

Entre 0,05 λ et 0,15 λ le rayonnement est avantagé dans le sens doublet-parasite. On dit qu'il fonctionne en « réflecteur ». Le gain est maximum pour

un espacement de 0,15 λ. Le fonctionnement en réflecteur ou en directeur est fonction aussi de la longueur des brins. Par rapport à la longueur du doublet celle du réflecteur est supérieure de 3 à 5 % et celle du directeur inférieure de 3 à 5 %.

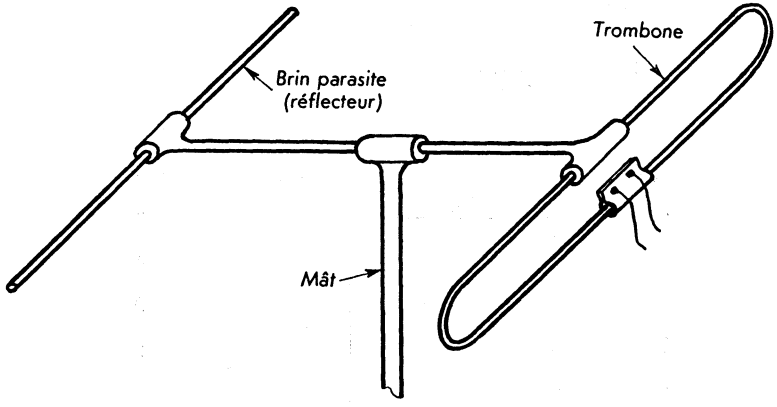


Fig. 9-54. — Aspect d'une antenne Yagi simple à 2 éléments (trombone plus réflecteur).

Une antenne Yagi à 3 éléments comporte un réflecteur placé à l'arrière et un directeur placé à l'avant. Cette combinaison permet d'obtenir un gain de 4 à 6 dB dans la direction de l'émetteur et le rapport gain avant-gain arrière atteint 5 dB. On a intérêt à ce que ce rapport soit grand afin d'éliminer les échos sur des obstacles placés à l'arrière de l'antenne, l'onde réfléchie pouvant arriver en opposition de phase avec l'onde directe.

— *Nombre d'éléments.*

Il sera fonction de la distance émetteur-récepteur. On n'utilise qu'un seul réflecteur mais le nombre de directeurs peut atteindre 10 dans le cas de longue distance fournissant un gain de 18 dB. La directivité augmente avec le nombre d'éléments.

On peut admettre que deux éléments suffisent jusqu'à 10 km et qu'il faut ajouter un élément supplémentaire chaque fois que la distance augmente de 10 km.

— *Adaptation d'impédance* (1).

L'impédance au milieu du doublet est diminuée lorsqu'on ajoute des brins parasites. Elle peut tomber à une dizaine d'ohms pour un grand nombre de brins parasites.

L'impédance diminue lorsqu'on rapproche les éléments mais le gain augmente.

L'impédance varie aussi avec la longueur des éléments parasites.

(1) L'adaptation est indispensable en télévision si l'on veut obtenir une image de qualité. En modulation de fréquence une mauvaise adaptation provoque seulement une diminution du gain.

Les réglages sont donc très nombreux et dépendront des qualités principales à obtenir : Gain maximal, bande passante, facilité d'adaptation, rendement maximal...

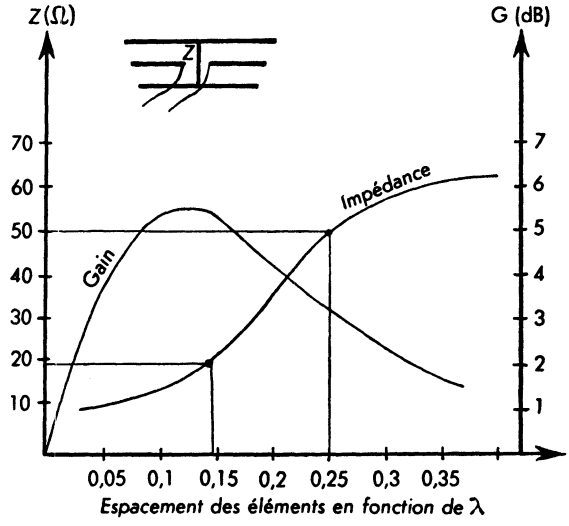


Fig. 9-55.

Les courbes de la figure 9-55 montrent les variations du gain et de l'impédance en fonction de l'espacement des éléments (pour une antenne Yagi à 3 éléments).

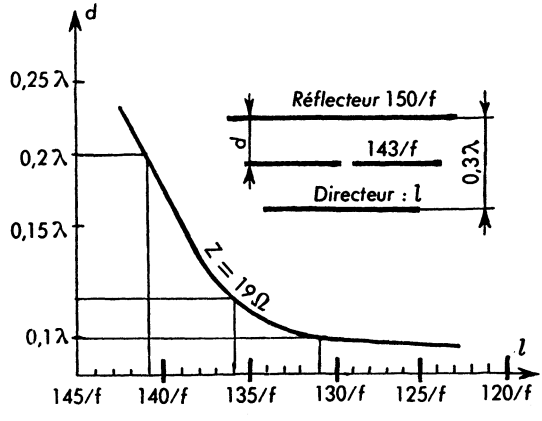


Fig. 9-56.

Nous remarquons que le gain est maximal au voisinage de 0,15 λ et donne une impédance d'environ 19 Ω au milieu du doublet. Cette impédance

est très intéressante car l'emploi d'un trombone de diamètre constant (rapport de transformation 4) la ramène à 75 Ω.

La courbe de la figure 9-56 montre, pour cette impédance, quelle doit être la longueur du brin directeur en fonction de l'écartement des éléments (pour une distance constante réflecteur directeur égale à 0,3 λ). Pour une distance d de 0,15 λ on obtient :

longueur du réflecteur $150/f$
longueur du doublet $143/f$
longueur du directeur $139/f$.

Lorsque l'impédance obtenue est supérieure à 20 Ω on peut tout de même la ramener à 75 Ω par l'emploi d'un trombone à deux diamètres différents donnant un rapport de transformation inférieur à 4 si $d_1 > d_2$, et supérieur à 4 (fig. 9-57) si $d_1 < d_2$ (pouvant dépasser 10 pour $d_2/d_1 > 5$). Cette solution est souvent utilisée en modulation de fréquence pour amener l'impédance à 300 Ω.

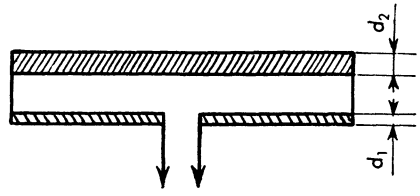


Fig. 9-57.

Le tableau de la figure 9-58 donne le résumé de quelques propriétés obtenues avec un doublet ou un trombone replié isolés ou associés avec des brins réflecteurs et directeurs.

d) Autres modèles.

Les antennes Yagi sont les plus utilisées pour l'émission et la réception sur ondes métriques mais d'autres modèles sont employés suivant qu'il s'agit de récepteurs à courte distance ou au contraire à longue distance ou pour les fréquences inférieures à 100 MHz (F.M. ou télévision sur bande I).

— *Antennes intérieures.*

Au voisinage immédiat de l'émetteur si l'immeuble ne présente pas de phénomènes d'absorption indésirables on peut utiliser un simple dipôle (ou une antenne à deux éléments : trombone et directeur) monté sur un socle au-dessus du récepteur (Télévision bande III).

Cette solution donne des antennes trop encombrantes pour la réception en modulation de fréquence et télévision bande I étant donné l'augmentation de la longueur d'onde (dipôle de 1,50 m pour 96 MHz). On emploie alors des dipôles repliés circulaires (fig. 9-60), ou en V (fig. 9-61), ou formés de deux brins réglables et inclinés (fig. 9-59).

A ces fréquences les phénomènes d'absorption étant moins marqués on peut incorporer l'antenne au récepteur sous forme de dipôle replié constitué par du ruban bifilaire ou du clinquant collé à l'ébénisterie (fig. 9-63).

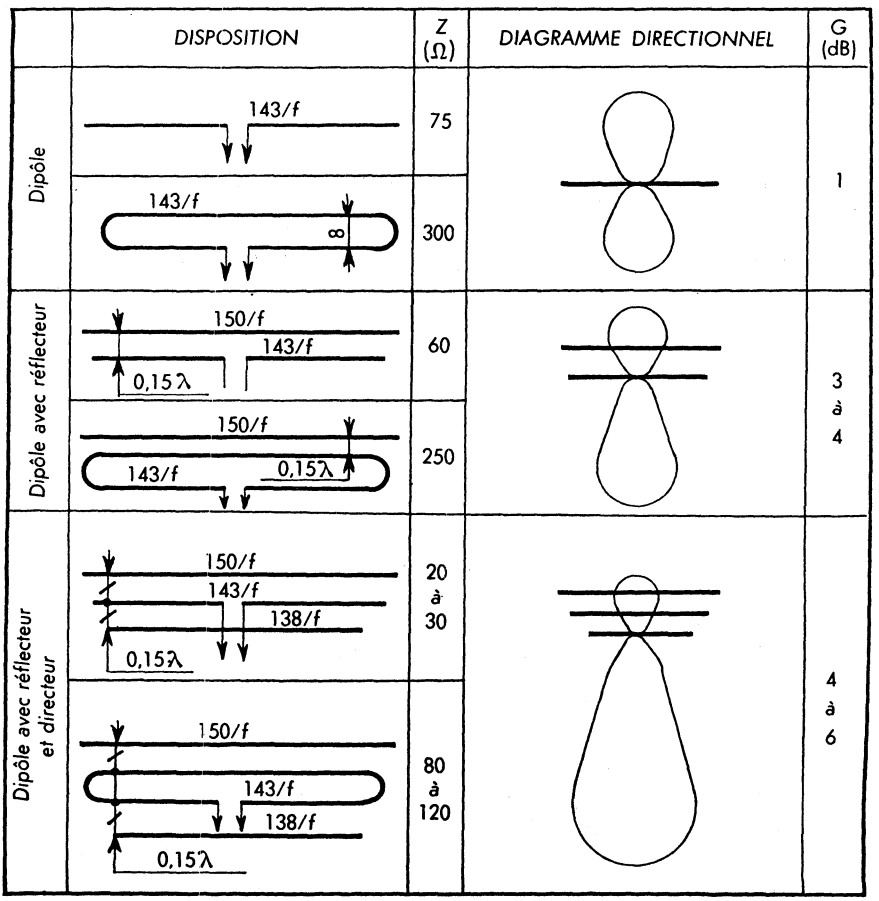


Fig. 9-58. — Tableau résumant les propriétés des doublets ou trombones.

L'antenne squelette (fig. 9-62) permet de par sa forme une installation incorporée facile et présente sur les précédentes l'avantage de donner un gain de 6 dB équivalent à celui d'une antenne Yagi à trois éléments. Les nœuds de tension en N et N' permettent une fixation non isolée en ces points. Son impédance est de 600 Ω aux ventres de tension en MM'. L'adaptation à un feeder 75 Ω ou 300 Ω se fait avec une ligne λ/4 en choisissant les points de connexions PP' en conséquence.

Lorsque pour des raisons d'encombrement on est obligé de réduire la longueur de l'aérien il peut être allongé artificiellement au moyen d'une bobine utilisée aussi comme adaptateur d'impédances (fig. 9-64).

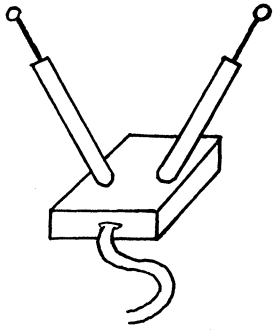


Fig. 9-59

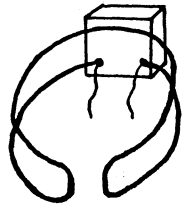


Fig. 9-60

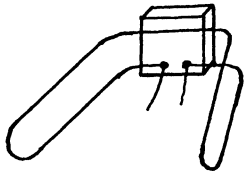


Fig. 9-61

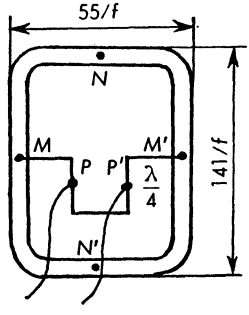


Fig. 9-62

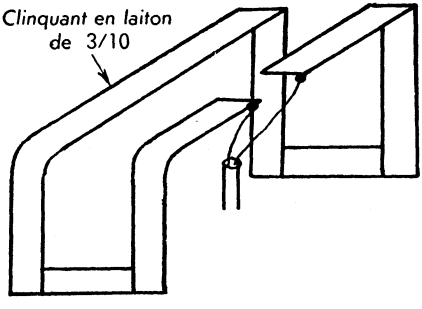


Fig. 9-63

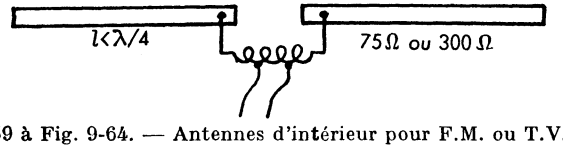


Fig. 9-64

Fig. 9-59 à Fig. 9-64. — Antennes d'intérieur pour F.M. ou T.V. bande I.

— *Antennes pour longues distances.*

A grande distance de l'émetteur ou dans une zone de réception difficile on emploie des antennes à grand gain, avec si nécessaire un préamplificateur situé le plus près possible de l'antenne.

Ce sont des antennes Yagi pouvant comporter jusqu'à 12 éléments (fig. 9-65), le gain atteignant de 10 à 20 dB suivant le nombre d'éléments. Si l'encombrement horizontal ne le permet pas, deux antennes Yagi peuvent être associées en parallèle (fig. 9-66).

L'antenne dièdre (fig. 9-67) est constituée d'un doublet $\lambda/2$ placé sur la bissectrice d'un réflecteur comportant une vingtaine d'éléments.

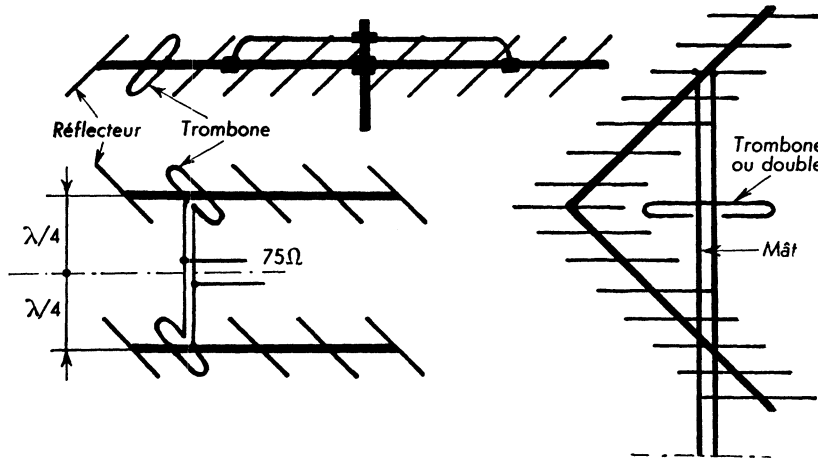


Fig. 9-65 à Fig. 9-67. — Antennes pour longue distance.

Les angles d'ouverture les plus favorables vont de 60 à 90°. Cette antenne utilisée sur bande III donne un gain voisin de 10 dB et donne un rapport avant-arrière très grand (> 30 dB) d'où son nom d'antenne anti-écho.

— *Antennes pour plusieurs canaux.*

Pour la réception de plusieurs canaux on procède de nombreuses façons dont les principes sont les suivants :

Pour deux canaux de même direction et de fréquences rapprochées une seule antenne Yagi peut être suffisante en élargissant suffisamment la bande aux dépens du gain et de la pureté.

Pour deux canaux de directions différentes on peut utiliser une antenne Yagi pour chacun d'eux mais l'installation sur le même mât est assez encombrante et coûteuse. Une seule antenne suffit avec un mât rotatif. L'emploi de deux trombones en croix est d'installation plus simple mais la largeur de bande insuffisante ne permet pas de recevoir des fréquences trop espacées. Elle est surtout utilisée en F.M. La figure 9-68 montre sa disposition et son diagramme directionnel (fig. 9-69).

Les antennes tous canaux, toutes directions sont assez complexes et de formes diverses. L'une des plus utilisées est indiquée à la figure 9-70. Elle est formée de trois éléments en *V* disposés à 120°. Le gain maximal dans une des trois directions privilégiées peut être obtenu par un commutateur court-circuitant l'un des éléments.

— *Antenne hélice* (fig. 9-71).

Elle permet une réception quel que soit le type de polarisation horizontale ou verticale. La bande de fréquence est large : ± 20 % environ de part et d'autre de la fréquence centrale pour laquelle elle a été calculée (gain 10 à 15 dB).

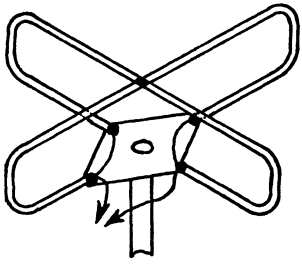


Fig. 9-68 *Antenne en croix*

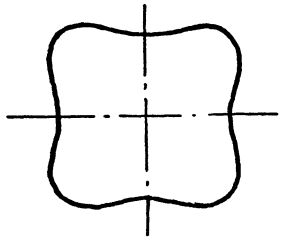


Diagramme directionnel d'une antenne en croix Fig. 9-69

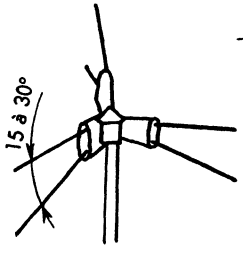
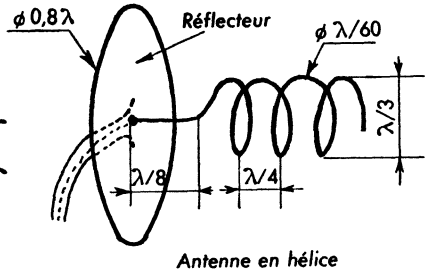


Fig. 9-70 *Antenne tous canaux toutes directions*



Antenne en hélice Fig. 9-71

3° Construction.

a) Matériaux.

Les antennes devant être légères et résistantes, le duralumin se prête bien à ces deux conditions. Par contre il ne peut être soudé mais seulement brasé en prenant certaines précautions.

D'autre part il se corrode plus facilement que d'autres alliages d'aluminium et en atmosphère saline il est préférable d'utiliser du Védal (A-U4G plaqué A 5).

Pour effectuer des liaisons de métaux différents (duralumin, cuivre, acier, etc.) il faut penser que leur association constitue des couples électrochimiques qui en présence d'humidité peuvent provoquer une corrosion très rapide.

Une protection des pièces en acier s'impose (cadmiage, bichromatage, zinguage). La protection générale est assurée par une peinture ou un vernis silicone.

Les extrémités de tubes sont obturées par des bouchons métalliques forcés.

Le trombone ou le doublet peut être en cuivre pour permettre une soudure au câble de descente.

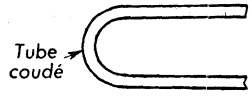


Fig. 9-72

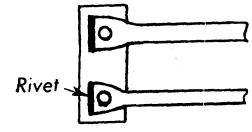


Fig. 9-73

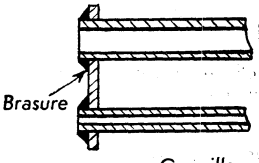


Fig. 9-75

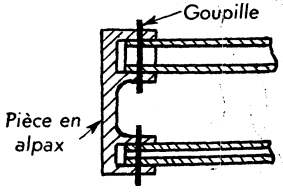


Fig. 9-74

b) Réalisation des trombones et antennes pliées.

Les figures 9-72 à 9-75 montrent diverses solutions, la plus courante étant celle du tube de diamètre constant coudé au moyen d'une cintreuse de tubes.

La fixation du trombone est différente suivant qu'il est placé directement en haut du mât ou sur le bras horizontal.

Les tubes ont des diamètres de 2 à 5 cm en modulation de fréquence et 8 à 12 mm en télévision (bande III).

c) Assemblages divers.

Les éléments utilisés sont généralement des tubes qui ont l'avantage d'être légers et d'avoir des pertes par effet pelliculaire plus faibles.

Les modes d'assemblage dépendent du type de jonction et du diamètre des tubes.

Les figures 9-76 et 9-77 indiquent deux sortes de jonctions isolantes d'un doublet. L'isolant est de la Bakélite ou mieux un isolant H.F. tel que le polyéthylène.

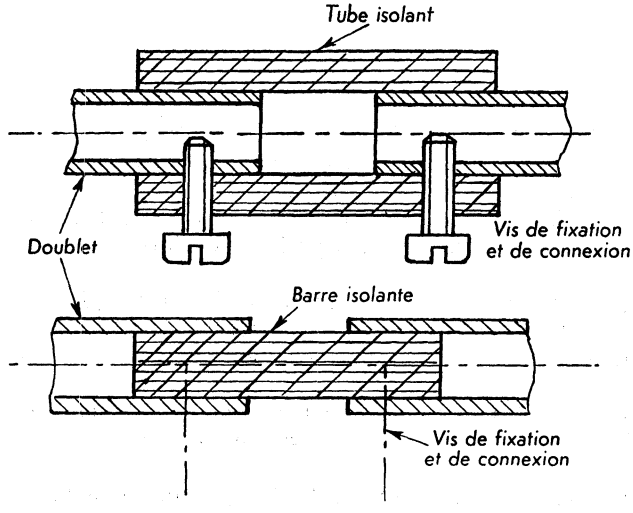


Fig. 9-76 et Fig. 9-77.

Les figures 9-78 à 9-82 montrent différentes solutions adoptées pour l'assemblage de tubes en té ou en croix.

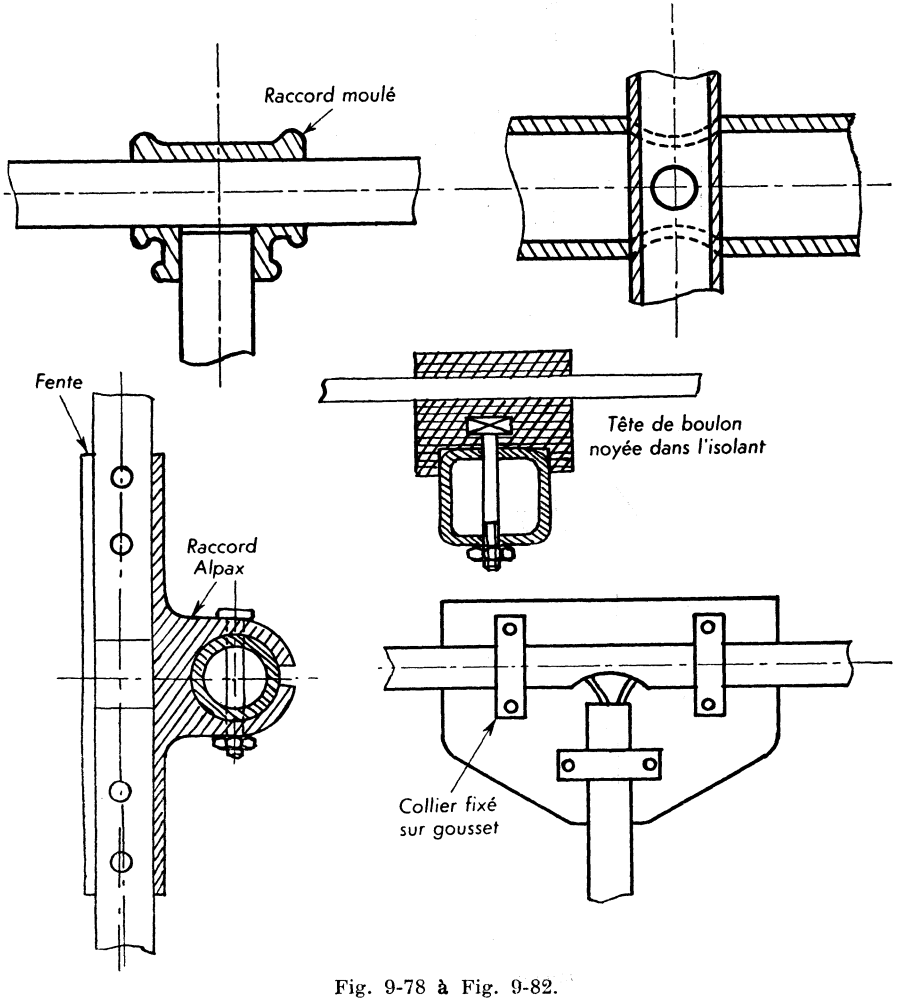


Fig. 9-78 à Fig. 9-82.

Les figures 9-83 et 9-84 sont relatives à l'assemblage des différents éléments d'un mât lorsque la hauteur le nécessite.

La figure 9-85 indique le montage d'une bride tournante pour fixation des haubans. Cette solution permet une rotation du mât afin de choisir la meilleure orientation.

Les fixations de mât sont nombreuses et dépendent de sa hauteur et de son emplacement (fixations par haubanage, à un pignon, à une cheminée, par traversée du toit...).

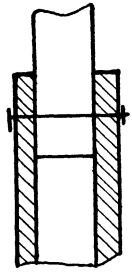


Fig. 9-83.

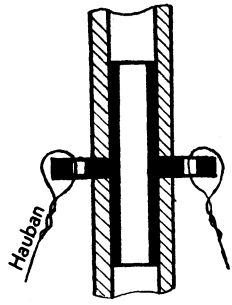


Fig. 9-84.

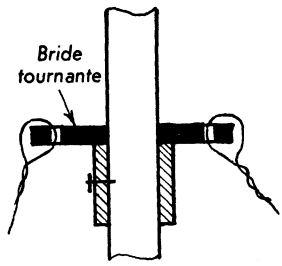


Fig. 9-85.

D - Antennes pour radars.

(Ondes décimétriques et centimétriques).

La propagation de ces ondes se rapproche de celle de la lumière. Elles sont arrêtées et réfléchies par les obstacles.

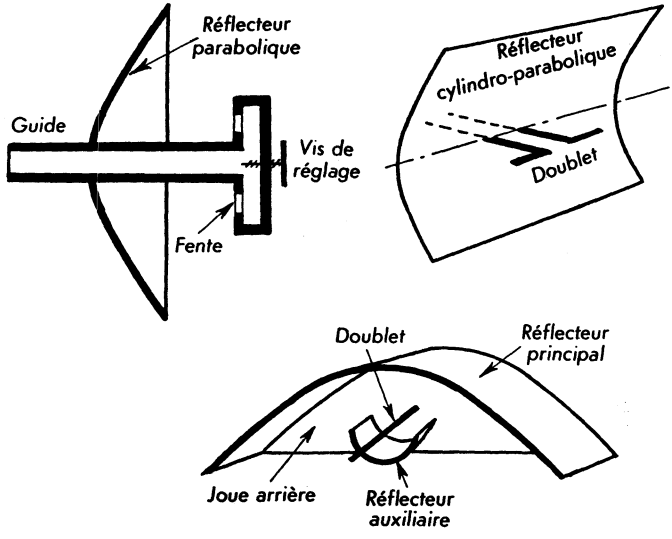


Fig. 9-86 à Fig. 9-88. — Antennes pour radars.

La longueur d'onde étant faible, l'antenne est petite. On utilise soit un doublet, soit une antenne à fente placés au foyer d'un réflecteur parabolique ou cylindro-parabolique. Il peut être plein ou constitué par un treillis métallique afin de diminuer la prise au vent.

La directivité augmente avec la distance du foyer au sommet de la parabole.

Les figures 9-86 à 9-88 indiquent quelques réalisations de telles antennes.

Les formes données au miroir dépendent des ouvertures du faisceau désirées dans le sens horizontal ou dans le sens vertical.

La même antenne sert pour l'émission et pour la réception de l'écho, les circuits électroniques étant commutés en conséquence.

E - Cadres.

1° Principe.

Un cadre est un collecteur d'ondes constitué par une ou plusieurs spires, sensible à la composante magnétique du champ (1). Comme nous allons le voir il existe des cadres à haute et à basse impédance.

La hauteur efficace d'un cadre est donnée par la formule :

$$h = 2\pi n S/\lambda$$

S : surface d'une spire en m^2,
λ : longueur d'onde en mètres,
n : nombre de spires,
h : hauteur effective en mètres.

En prenant comme exemple $\lambda = 300$ mètres, $S = 0{,}1\ m^2$ et $n = 10$, on obtient $h = 0{,}02$ mètre alors que la hauteur effective d'une antenne d'appartement est de 0,4 mètre environ.

Cette faible hauteur effective nécessite souvent un étage H.F. supplémentaire.

2° Avantages.

La figure 9-89 montre le diagramme de directivité d'un cadre. On voit que sa sensibilité est maximale lorsque son plan est orienté dans la direction de l'émetteur. Il n'est donc pas sensible aux parasites venant d'une direction perpendiculaire et il est très sélectif. Le cadre doit pouvoir s'orienter dans la direction de l'émetteur.

D'autre part les parasites faisant surtout sentir leur action par leur composante électrostatique les cadres y sont peu sensibles.

Par ailleurs ils sont peu encombrants.

3° Inconvénients.

L'énergie recueillie est faible de par la petitesse de leur hauteur effective mais l'avènement des ferrites et la construction des cadres à haute impédance ont permis de pallier cet inconvénient.

Ils sont sensibles à des parasites venant de la même direction que l'émetteur ou de la direction opposée.

(1) Les antennes étudiées précédemment étaient surtout sensibles à la composante électrostatique. Une antenne peut être comparée à un condensateur et un cadre à une inductance.

4° Différents types.

a) Cadres à basse impédance.

Ils sont constitués par une ou deux spires en fil de cuivre ou d'aluminium de 5 à 6 mm de diamètre orientables. Etant à basse impédance, ils sont reliés au primaire d'un transformateur d'adaptation à l'entrée d'un préamplificateur H.F. enfermé dans un blindage métallique évitant la pénétration directe des parasites (fig. 9-92).

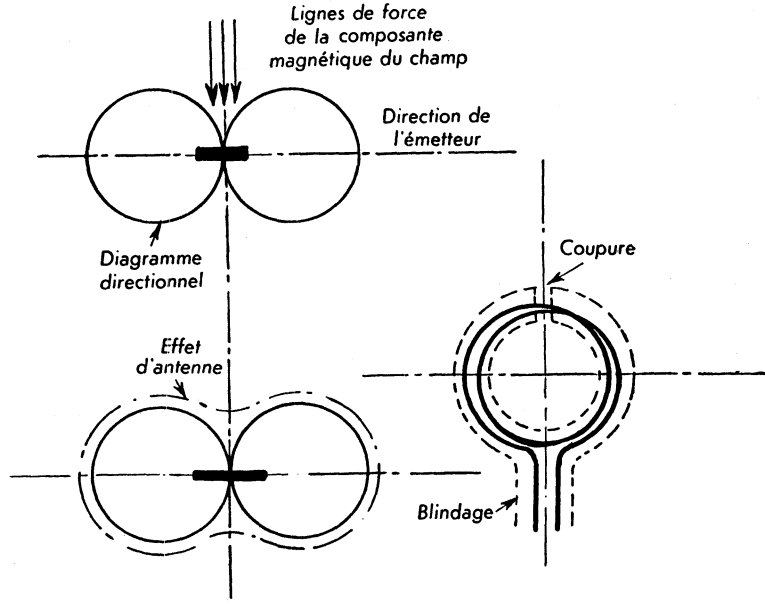


Fig. 9-89 à Fig. 9-91. — Cadre : Principe.

En goniométrie (1) on utilise la propriété directive des cadres mais ils présentent normalement une certaine capacité qui produit un effet d'antenne et diminue la directivité (fig. 9-90). Pour supprimer cet effet on les entoure d'un blindage électrostatique présentant une coupure de façon à ne pas constituer une spire en court-circuit (fig. 9-91). La liaison et le primaire du transformateur doivent être aussi blindés.

b) Cadres à haute impédance.

— *Cadre à air* : Le nombre de spires est élevé et elles constituent les bobinages d'accord eux-mêmes. Les figures 9-93 et 9-94 montrent l'aspect d'un tel cadre qui est incorporé au récepteur. Le blindage est constitué par un

(1) La radiogoniométrie est un procédé de navigation aérienne permettant de déterminer la direction dans laquelle se trouve le poste émetteur.

fil enroulé en hélice sur le boîtier en carton, une extrémité étant réunie à la masse. L'orientation du cadre est obtenue par un flexible à partir d'un bouton de manœuvre.

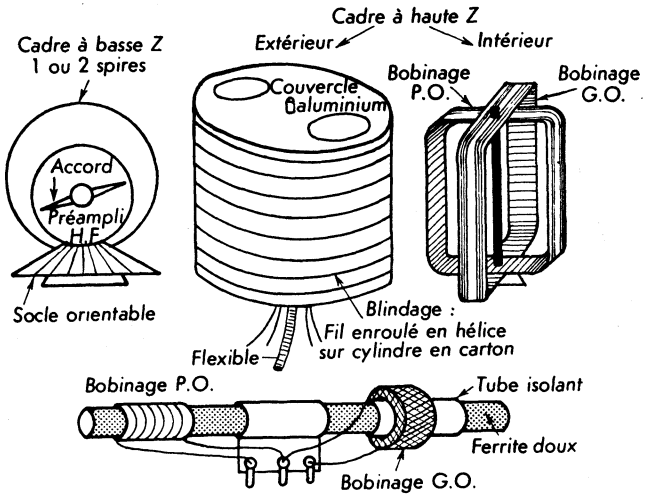


Fig. 9-92 à Fig. 9-95. — Modèles de cadre.

— *Cadre à ferrite.*

La grande perméabilité des ferrites permet de capter une grande énergie sur une surface relativement petite. Les spires placées sur un bâtonnet de ferrite (fig. 9-95) constituent comme précédemment les bobinages d'accord. Ces cadres peuvent être fixes (postes portatifs) ou orientables (postes d'appartement). La réception en O.C. nécessite l'emploi d'une antenne séparée.

Bien qu'ayant apporté des solutions originales dans la diminution de l'encombrement et la lutte contre les parasites, ces cadres ne peuvent remplacer une bonne antenne.

III. ANTENNES D'ÉMISSION (à grande puissance).

A - Antennes pour ondes hectométriques (P.O.).

Celles qui ont le meilleur rendement sont les antennes verticales dont la hauteur est comprise entre $\lambda/2$ et $\lambda/4$. Les antennes demi-onde prolongées ($0{,}55\ \lambda$) ont des propriétés antifading. Elles sont constituées par un pylône vertical en treillis haubané (fig. 9-96). Pour des hauteurs inférieures à 60 mètres le pylône est simplement constitué par un tube d'acier de 5 à 20 centimètres de diamètre. Les haubans et le pylône sont isolés de la terre par des isolateurs en porcelaine.

Pour des stations moins importantes l'antenne est formée d'un fil vertical suspendu à une nappe de fils soutenue par deux pylônes. Cette nappe isolée des pylônes forme une capacité terminale modifiant l'impédance à la base de l'antenne et facilitant l'adaptation au feeder (fig. 9-97).

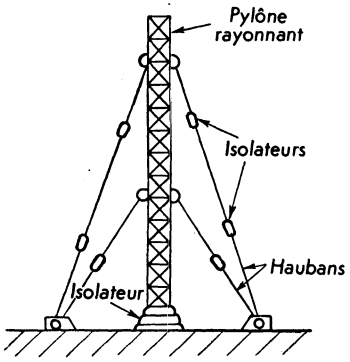


Fig. 9-96. — Antenne d'émission verticale pour onde hectométrique.

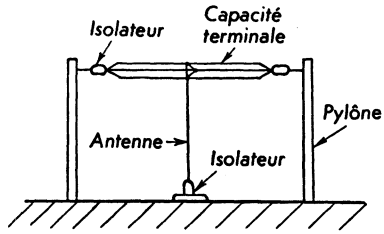


Fig. 9-97. — Antenne d'émission verticale à capacité terminale.

Les antennes à capacité terminale sont détrônées par les pylônes rayonnants ou par des dispositifs complexes à rayonnement zénithal réduit, afin d'augmenter la portée en diminuant les réflexions parasites sur l'ionosphère. Lorsqu'on désire obtenir un effet directif on ajoute au pylône principal un pylône réflecteur, situé à une distance $\lambda/4$. Il n'est généralement pas alimenté et comporte une réactance de réglage à la base.

Les différents modes d'attaque du mât sont les suivants :

— Coupure à la base avec isolateur capable de supporter le poids de l'antenne.

— Attaque en shunt, la base du mât étant réunie à la terre.

— Coupure assez haut sur le mât, l'énergie étant amenée par coaxial à l'intérieur du pylône.

B - Antennes pour ondes kilométriques (G.O.).

Leur principe constructif est analogue à celui des antennes pour ondes hectométriques mais pour des raisons de prix de revient elles doivent être réduites, d'où une faible résistance de rayonnement et une faible impédance d'entrée (15 à 25 Ω). L'impossibilité de réaliser des feeders d'aussi basse impédance nécessite de munir l'antenne d'une forte capacité terminale pour augmenter l'impédance à la base de l'antenne et permettre l'adaptation au feeder.

C - Antennes pour ondes décamétriques (O.C.).

1° Antennes accordées.

A cause de ses propriétés directives, c'est l'antenne doublet qui est la plus utilisée (fig. 9-98). Pour les grandes puissances elle est constituée par des cages de fils suspendues (fig. 9-100). Sa longueur pour une antenne demi-onde est $\lambda/2$ et son impédance 72 Ω. En réalisant des doublets repliés à 2 fils on augmente l'impédance d'entrée (300 Ω) et on élargit la bande passante.

Ces antennes sont systématiquement utilisées en polarisation horizontale.

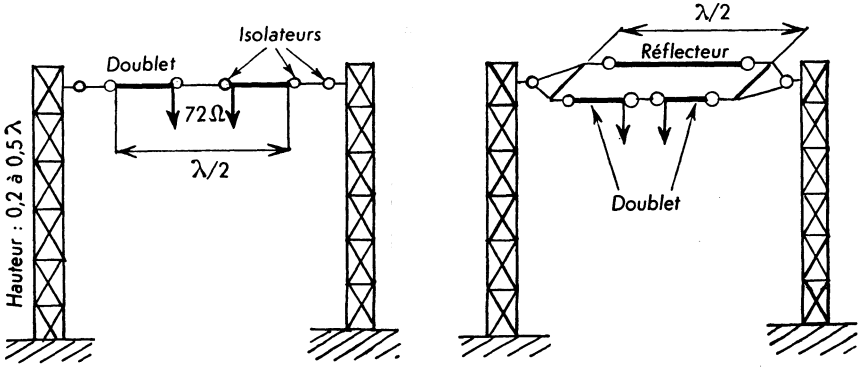


Fig. 9-98 et Fig. 9-99. — Antennes doubles pour émetteurs sur ondes décamétriques.

Pour augmenter la directivité on complète l'antenne par un réflecteur accordé (fig. 9-99) situé à une distance $\lambda/4$ de l'antenne. Dans le cas d'antennes très directives on dispose un certain nombre de doublets superposés dans le plan vertical constituant un « rideau » de doublets supporté par des pylônes métalliques pouvant dépasser 100 mètres de hauteur.

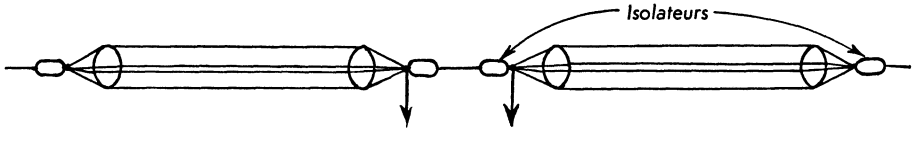


Fig. 9-100. — Antenne doublet pour grande puissance.

2° Antennes à ondes progressives.

Elles ne sont pas le siège comme les précédentes d'ondes stationnaires mais d'ondes progressives permettant de les utiliser sur une large bande de fréquences. Elles sont constituées de fils formant les côtés d'un losange (dimension des côtés 3 à 10 λ) supporté par des pylônes métalliques de 15 à 30 mètres de hauteur. Pour diminuer le taux d'ondes stationnaires elles sont terminées par une résistance.

D - Antennes pour ondes métriques (O.T.C.).

1° Antennes dipôles demi-onde.

Elles sont constituées de plusieurs étages de dipôle afin d'améliorer le gain dans le plan horizontal (fig. 9-101). Pour obtenir un diagramme de rayonnement pratiquement omnidirectionnel on utilise des doublets perpendiculaires alimentés par des courants en quadrature. On obtient des antennes « tourniquet » (fig. 9-102). L'utilisation de dipôles de gros diamètre et de dipôles repliés permet d'élargir la bande passante.

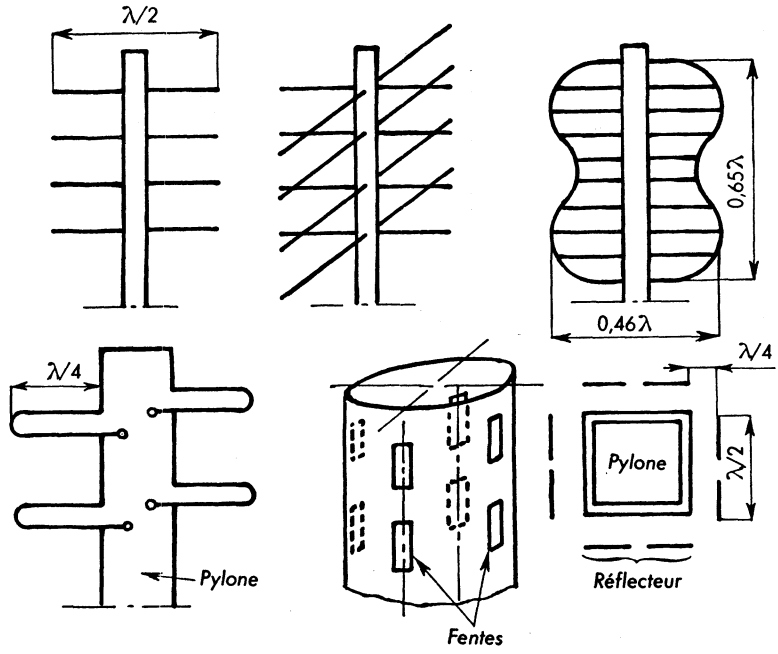


Fig. 9-101 à Fig. 9-106. — Antennes émettrices pour ondes métriques.

2° Antennes à « papillon » (fig. 9-103).

Elles sont constituées par deux surfaces de conducteurs en forme d'ailes de papillon. Elles sont attaquées au centre et sont équivalentes à deux doublets demi-ondes. Elles ont une très large bande passante. Pour obtenir un diagramme omnidirectionnel on utilise deux systèmes perpendiculaires alimentés par des courants en quadrature (antennes « supertourniquet »). Elles sont faciles à fixer sur un support vertical car les extrémités peuvent être reliées à la masse.

3° Antennes unipôles (fig. 9-104).

Elles sont constituées par des unipôles repliés et fixées par une extrémité à un support qui peut être de gros diamètre et relié à la masse. Pour l'obtention d'un diagramme sensiblement omnidirectionnel on dispose trois séries d'unipôles à 120° alimentés par des courants déphasés de $2\pi/3$.

4° Antennes à fentes.

Elles sont réalisées sous forme de cylindre de grand diamètre (2 mètres environ) comportant plusieurs étages de fentes attaquées par le milieu. Un diagramme omnidirectionnel peut être obtenu en disposant quatre systèmes de fentes perpendiculaires (fig. 9-105). La bande passante est assez faible.

5° Antennes à réflecteur « ou supergain ».

Elles sont constituées par des doublets ou papillons placés à une distance $\lambda/4$ des faces d'un pylône vertical agissant comme réflecteur. Elles ont un gain supérieur aux antennes sans réflecteur pour un même encombrement vertical (fig. 9-106).

IV. LIGNES OU FEEDERS.

Elles relient l'antenne à l'émetteur ou au récepteur.

A - Caractéristiques des lignes.

1° Impédance caractéristique.

C'est le rapport de l'impédance série par unité de longueur, à l'impédance parallèle par unité de longueur.

$$Z_c = \frac{Z_s}{Z_p} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{impédance série} \\ \leftarrow \text{impédance parallèle} \end{matrix}$$

Z_s dépend de la résistance série et de l'inductance propre,
Z_p dépend de la résistance d'isolement et de la capacité.

Pour les hautes fréquences les résistances sont négligeables et on peut écrire :

$$Z_c \approx L/C$$

Z_c est pratiquement indépendant de la fréquence et varie avec la grosseur des conducteurs et leur espacement.
La longueur d'une ligne adaptée peut être quelconque.

2° Adaptation d'impédances.

Pour pouvoir utiliser le maximum d'énergie (rendement maximal) la ligne doit être adaptée aux deux extrémités c'est-à-dire que son impédance

caractéristique doit correspondre à celle de l'antenne aux points de connexions et à celle de l'entrée du récepteur ou de la sortie de l'émetteur.

Une ligne ouverte à son extrémité est le siège d'ondes stationnaires et aucune énergie n'est absorbée.

Une ligne fermée à son extrémité et bien adaptée est le siège d'ondes progressives qui sont absorbées entièrement par l'utilisation.

Si la ligne est mal adaptée il subsiste un certain taux d'ondes stationnaires (1) qui diminue le rendement puisqu'elles ne sont pas absorbées en extrémité.

On voit donc l'intérêt d'avoir un taux d'ondes stationnaires faible, c'est-à-dire une ligne bien adaptée à ses deux extrémités.

Un certain nombre de procédés d'adaptation ont été étudiés aux pages 325 et 337.

3° Pertes en ligne.

a) Pertes par effet pelliculaire.

Les courants H.F. ne circulant qu'en surface la partie centrale est inutilisée et nous avons vu que la résistance en H.F. d'un conducteur est beaucoup plus élevée que sa résistance en courant continu, d'où l'intérêt d'utiliser des conducteurs creux ou des conducteurs argentés.

b) Pertes dans les isolants.

Les isolants n'étant pas parfaits ils sont parcourus par des courants de fuite d'autant plus élevés que la fréquence est élevée. Les pertes seront d'autant plus faibles que l'isolant entre les deux conducteurs sera meilleur et que son épaisseur sera grande. L'air est évidemment le meilleur mais on est obligé de lui substituer en tout ou partie des isolants solides afin de maintenir constant l'écartement des conducteurs. On choisira d'excellents isolants H.F. (polystyrène, polyéthylène, polytétrafluoréthylène).

c) Pertes par rayonnement.

Elles seront faibles si l'écartement des conducteurs est faible par rapport à la longueur d'onde qui parcourt la ligne car les deux conducteurs sont parcourus par des courants en opposition de phase qui annulent pratiquement leurs effets.

Ces pertes sont augmentées par la présence d'ondes stationnaires dans la ligne car le courant maximal est plus élevé d'où une autre raison d'avoir une ligne bien adaptée.

(1) T.O.S. : Taux d'ondes stationnaires $= Z_t/Z_c$, Z_t étant l'impédance terminale de la ligne et Z_c son impédance caractéristique. Coefficient de réflexion $k = \dfrac{\text{TOS} - 1}{\text{TOS} + 1} = \%$ du courant réfléchi. Le pourcentage d'énergie réfléchie est donc égal à k^2. Le pourcentage d'énergie absorbée sera $(1 - k^2)$.

B - Réalisation.

1° Ligne bifilaire (1).

Elle est anti-parasite car les effets des courants induits par les parasites dans chaque brin s'annulent. Pour obtenir une meilleure symétrie vis-à-vis des parasites on peut utiliser une descente « transposée » (fig. 9-107) ou une descente torsadée (fig. 9-108) employées avec une antenne doublet.

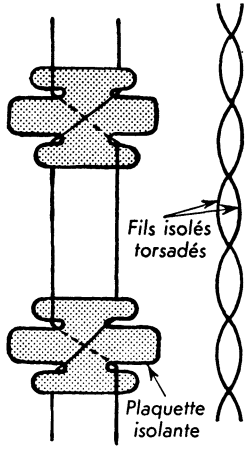


Fig. 9-107

Fig. 9-108

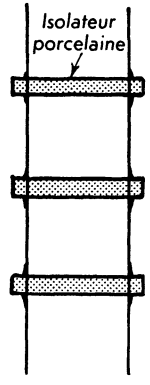


Fig. 9-109

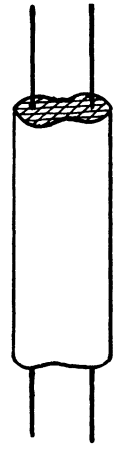


Fig. 9-110

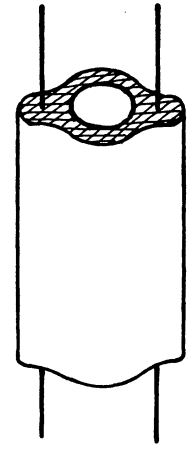


Fig. 9-111.

Les lignes 600 Ω ou 300 Ω utilisées en émission sont réalisées dans l'air (2). Les fils parallèles sont maintenus à un écartement constant par des isolateurs (fig. 9-109).

Les lignes 300 Ω commerciales utilisées en modulation de fréquence ou en émission amateur sont constituées par deux fils parallèles enrobés dans du polyéthylène (fig. 9-110). Ces rubans plats sont sensibles à l'humidité qui augmente les pertes.

Le modèle de la figure 9-111 est beaucoup moins sensible à l'humidité car l'isolant entre les deux conducteurs est surtout constitué par l'air.

(1) La descente d'antenne unifilaire n'est pas à proprement parler une ligne puisqu'elle fait partie de l'antenne et n'est pas adaptée. Le retour se fait par la capacité antenne-terre.

(2) L'impédance caractéristique d'une ligne à air est donnée par la formule $Z_c = 276 \lg 2D/d$ (ligne bifilaire) ou $Z_c = 138 \lg D'/d$ (ligne coaxiale).

d : diamètre du fil en mm. D : distance d'axe en axe des 2 fils en mm.

D' : diamètre intérieur du tube. Avec un diélectrique de permittivité ε multiplier les valeurs des impédances ci-dessus par $1/\sqrt{\varepsilon}$.

2° Câbles coaxiaux.

Ces câbles ont généralement une impédance caractéristique de 75 Ω.

Pour les émetteurs puissants ils sont faits de tubes en cuivre de gros diamètre pouvant dépasser 10 centimètres dans l'axe duquel est maintenu le conducteur central à l'aide de rondelles pleines ou étoilées espacées régulièrement (fig. 9-112). Le diélectrique est pratiquement de l'air qui doit être maintenu sec pour éviter les pertes.

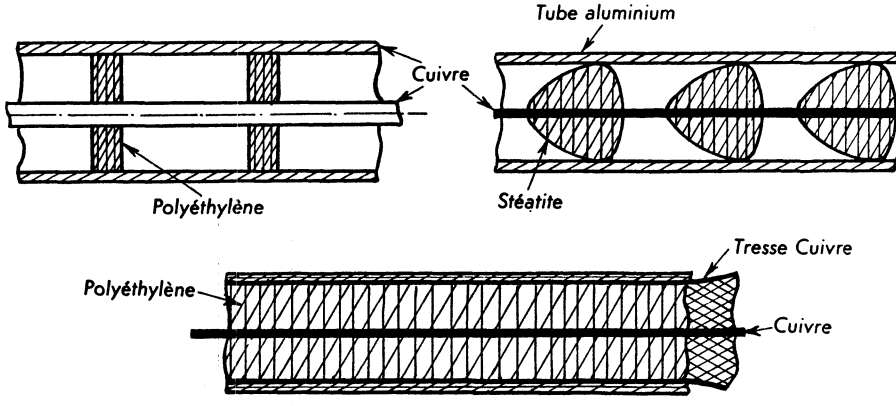


Fig. 9-112 à Fig. 9-114. — Câbles coaxiaux.

En émission d'amateur, en télévision on emploie des câbles souples, le conducteur central étant maintenu par des perles en stéatite (fig. 9-113) ou un isolement continu en polyéthylène (fig. 9-114). Certains de ces câbles sont dits semi-aérés et contiennent une hélice isolante permettant la circulation d'air. Dans tous les cas l'extrémité du câble doit être dirigée vers le bas pour éviter la pénétration de l'humidité due aux intempéries ou bien il faut les protéger par un raccord étanche.

A l'émission l'emploi d'un câble coaxial permet de réduire les pertes par rayonnement et à la réception il assure une protection efficace contre les parasites.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Livres.

CHAMPEIX. — *Physique et technique des tubes électroniques*, Dunod, Paris, 1960.
TARRIDEC. — *Précis de télévision*, Dunod, Paris, 1958.
HEYBOER et ZIJLSTRA. — *Tubes d'émission*, Dunod, Paris, 1954.
MOUNIC. — *Electronique industrielle*, Foucher, Paris.
MARTIN. — *Technique des hyperfréquences*, Editions de la Radio, Paris, 1951.
CHRÉTIEN. — *Tubes électroniques à gaz*, Chiron, Paris, 1953.
ZWORYKIN et RAMBERG. — *La photo-électricité et ses applications*, Dunod, Paris, 1953.
GUILBERT. — *Transformateurs radio*, Editions de la Radio, Paris, 1959.
BESSON. — *Les bobinages*, Editions Dupuis, Paris.
BRIGGS. — *Le haut-parleur*, Dunod, Paris.
HEMARDINQUER. — *Les microphones*, Chiron, Paris, 1948.
CLOUARD. — *Les microphones*, Dunod, Paris, 1955.
GUILBERT. — *La pratique des antennes*, Editions de la Radio, Paris, 1959.
BRAULT et PIAT. — *Les antennes*, Librairie de la Radio, Paris, 1954.
THOUREL. — *Les antennes*, Dunod, Paris, 1956.
SLOT. — *Du microphone à l'oreille*, Dunod, Paris, 1956.

Normes.

AFNOR, 23, rue Notre-Dame des Victoires, Paris (2e).
U.T.E., 54, avenue Marceau, Paris (8e).
C.C.T.U., 76, rue du Général-Leclerc, Issy-les-Moulineaux (Seine).
S.N.I.R., S.I.T.E.L., 23, rue de Lübeck, Paris (16e).

Revue.

La pièce détachée, Editions LEPS, 21, rue des Jeûneurs, Paris (2e).

Notices des constructeurs.

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

Accord de fréquence, 66.
Accrochages (risques d'), 17.
Activateur, 36, 42, 108.
Adaptation d'antenne, 314, 325.
Aimants pour cadrage, 49.
— pour piège à ions, 47.
— pour H.P., 260.
Alcatron, 147.
Alternat, 86.
Alimentation d'antenne, 324.
Amplification, 17.
Ampoules, 51, 87.
Analyseur de télévision, 104, 110.
Anodes, 6.
Anode accélératrice, 39.
— cavitrap, 18.
— coupée en sifflet, 47.
— de concentration, 39.
— d'entretien, 87.
— de thyratrons, 77.
— de tubes à vapeur de Hg, 87.
— de tubes d'émission 25, 29, 33.
— post-accélératrice, 40.
Antennes à fente, 333, 353.
— à papillon, 352.
— : caractéristiques, 319.
— : classification, 327.
— demi-onde, 314.
— d'émission, 349.
— de réception, 328.
— dipôle, 333, 352.
— directives, 314.
— doublet, 335.
— fictives, 314.
— intérieures F.M. et T.V., 341.
— « longue distance », 342.
— pour avions, 333.
— pour radars, 346.
— pour véhicules, 333.
— quart d'onde, 314.
— : symboles, 315.
— tous canaux, 343.
— trombone, 336.
— T.V. et F.M., 324.
— Yagi, 336.
Anticathode, 118.
Arrêt automatique, 309.
Audiogramme, 221.
Autotransformateur, 155, 165.

B

Baffle, 251, 269, 271.
Balance magique, 55.
Bandes magnétiques, 291.
Barrière de potentiel, 125.
Base d'une substance luminescente, 36.
Bâti de H.P. 269.
Batterie (tubes), 23.
Bel, 217.
Blindage magnétique, 197.
Blocs d'accord, 204, 207.
Bobinage, 156.
Bobinages pour émission, 215.
— pour réception H.F., 202.
— pour télévision, 213.
Bobines cylindriques, 198.
— d'arrêt H. F., 213.
— en nids d'abeilles, 199.
— en vrac, 199.
— mobiles pour H. P., 261.
— pour balayage lignes, 214.
— pour V.H.F., 213.
— toroïdales, 199.
Bobineuses, 199.
Bras de lecture, 296, 304.
Brillance, 37, 92.
Bruit de fond, 17, 284.
— de modulation, 284.

C

Cadrage, 49.
Cadre, 314.
Cadres (modèles de) , 348.
Calcul de bobinages H.F., 200.
— de transfo B.F., 171.
— de transfo d'alimentation, 162.
— d'une inductance B.F., 182.
Candéla, 91.
Canon coudé, 46.
Canon électronique 35, 65.
Capacités inter-électrodes, 10.
Capacité répartie, 188.
Captation (espace de), 64.
Caractéristique courant-lumière, 113.
— de commande, 71, 77.
— de réponse, 218.
— spectrale, 92, 95, 114.
— statique 2, 8.
Caractéristiques : bobinages H.F., 203.
— : diodes à vide, 2.
— : diodes à jonction, 139.

Caractéristiques : diodes à pointe, 138.
— : inductances B.F., 183.
— : pentodes, 15.
— : redresseurs secs, 131.
— : tétrodes, 12, 13.
— : transfo B.F., 174.
— : transfo d'alimentation, 165.
— : transistors, 151.
— : triodes 8.
— : tubes photoélectriques, 94.
Carcasse, 156, 176.
Carcinotron, 68.
Cavité résonante, 60.
Cartouche à gaz rare, 85.
Cathodes : redresseurs, 87, 89.
— : thyratrons, 76.
— : transparentes, 96.
— : tubes à vide, 4, 38.
— : tube d'émission, 24, 29.
Cellules photoconductives, 107, 117.
— photovoltaïques, 117.
Césium, 97.
Chambre de compression, 275.
Champ dans l'entrefer, 253.
Champ électromagnétique, 315.
Changeur de disques, 310.
Charge d'espace, 1.
Chauffage H. F., 33.
Child-Langmuir (loi de), 2.
Chute anodique, 71.
— cathodique, 70.
— de tension interne, 129.
Cinéma, 99.
Cinescopes, 44.
Circuit magnétique, 156, 158, 166, 174, 259.
Code : substances luminescentes, 42.
— : transistors, 153.
— : tubes cathodiques, 44.
— : tubes d'émission, 31.
— : tubes photoélectriques, 116.
— : tubes professionnels, 22.
Coefficient d'amplification, 9, 12.
— de déviation, 36.
Col de tube cathodique, 34.
Collecteur, 60.
Commutateur, 106, 86.
Compactron, 20.
Comptage, 56, 86, 99.
Compteur à scintillation, 102.
Compteur de Geiger, 84.
Concentration (électrode de), 35.
— électrostatique, 47.
— magnétique, 48.
Cône anti-directif, 280.
— de H.P., 263.
— d'oscilloscope, 34.
— inversé, 266.
Conque Elipson, 276.
Constante de Planck, 92.
Convergence, 36.
Corrugations, 264.
Couche d'arrêt, 125.
Courant d'allumage, 71.
— de crête anodique, 74.
— de saturation, 3.
— direct (inverse), 124.
— d'obscurité, 92, 95.
— moyen anodique, 74.
Courbe de réponse, 218.
Cryotron, 122.
Culasse, 156.

D

Décatron, 86.
Décibel, 217.
Décharge autonome, 70.
— d'arc, 70, 72.
— disruptive, 70.
— électrique, 70.
— luminescente, 70, 72.
— non autonome, 70, 71.
— semi-autonome, 70, 72.
Déclin, 36.
Dégazeur, 26-33.
Densité de courant redressée, 128.
— d'un faisceau, 36.
Désaccentuation, 284.
Désionisation, 70.
Déviation électrique, 38.
— (électrode de), 35.
— magnétique, 45, 50.
— (plaques de), 39.
— (sensibilité de), 36.
Diagramme directionnel, 219, 323.
Diathermie, 35.
Diodes à capacité variable, 144.
— à cristal, 123, 135.
— à jonction, 136.
— à pointes, 137.
— à vide, 1, 2.
— au Ge ou Si, 136.
— de détection, 5.
— de redressement, 6.
— régulatrices, 143.
— tunnel, 145.
— Zéner, 143.
Directivité d'un H.P., 253.
— d'un micro., 224.
Disque, 284.
Disques (défaut des), 290.
— « mère », 289.
— « père », 289.
— scellés, 58.
Distorsions, 221.
— du spot, 37.
— en trapèze, 37.
Dynatron (effet), 13.
Dynode, 14, 101.

E

Éclairement, 92.
Écouteur, 251.
Écouteur électromagnétique, 280.
— interne, 281.
Écran, 103.
Écran acoustique, 251, 269.
— aluminisé, 51.
— de cinescopes, 51.
— d'oscilloscope, 35, 41.
— électrostatique, 168.
Effet d'îlot, 11.
— dynatron, 12.
— Edison, 1.
— Larsen, 237.
— Schottky, 4.

Effet photoélectrique, 92.
— photoémissif, 93.
— photorésistant, 107.
— photovoltaïque, 92, 111.
Efficacité d'un H.P., 252.
— d'une tête magnétique, 311.
— d'un lecteur, 296.
— d'un microphone, 223.
— d'un redresseur, 124.
— d'un transducteur, 218.
Électrode d'accélération, 35.
Électrode d'amorçage, 89.
— de focalisation, 101.
— de concentration, 118.
Électromètre (tube), 23.
Éléments bimorphes, 234.
— micrologiques, 148.
Émission secondaire, 14, 102.
— thermo-électronique, 1.
— (tubes d'), 24.
Énergie d'excitation, 70.
— d'ionisation, 69.
Enregistrement, 283.
Enroulement, 155.
Entraînement, 308.
Entrefer, 157.
Enveloppes de tubes, 25, 43, 90.
Erreur de piste, 304.
Essais des bobinages B.F., 184.
— des bobinages H.F., 204.
— des noyaux H.F., 197.
— des redresseurs secs, 133.
— des transfo F.I., 209.
— des tôles, 159.
Espace de captation, 64.
— de glissement, 60-64.
— de modulation, 64.
Excitation d'un gaz, 70.
— par degrés, 70.
Excitron, 88.
Extincteur, 36.
Extinction, 72.

F

Facteur d'amplification, 10, 12, 15, 17.
Facteur d'amplification d'un gaz, 93.
— de directivité, 219.
— de commande, 71, 79.
Fatigue, 36, 114.
Feeder, 353.
Fer divisé, 191.
Ferrites doux, 193.
Fiabilité, 24.
Fidélité d'un H.P., 252.
— d'un lecteur, 296.
— d'un microphone, 224.
Filtre, 52.
Finesse du spot, 37.
Fluorescence, 36.
Flux lumineux, 92.
Flying-spot, 102.
Focalisation, 36.
Fond d'un tube, 34, 51.
Force d'appui, 297.
Fréquence fondamentale, 217.
Fréquence maximale d'emploi, 129.
Fréquences (nomenclature des), 315.

G

Gaz, 73.
Géométrie de la triode, 9.
Glissement (espace de), 64.
Graveurs, 287.
Gravure, 287.
Grille, 7.
Grille d'arrêt, 15.
— de commande, 89.
— de désionisation, 89, 91.
— de thyratrons, 77.
— de tubes d'émission, 25, 29.
— de tubes à vapeur de Hg, 87.
— écran, 11.
Guide d'onde, 60.

H

Halo, 37.
Harmoniques, 17, 217.
Hauteur d'un son, 220.
Hauteur d'une antenne, 320.
Heptode, 18.
Hexode, 18.
Haut-parleur, 251.
Haut-parleurs : (association de), 277.
— : classification, 253.
— : électrodynamiques, 255, 259.
— : électrostatiques, 258.
— : électromagnétiques, 255.
— : limites d'emploi, 255, 257.
— : piézo-électriques, 257.
— : schémas, 252.
Hyperluminosité du spot, 37.

I

Iconoscope, 104.
Igniteur, 90.
Ignitron, 90.
Indice de directivité, 219.
Indicateur cathodique, 53.
Inductances B.F., 182.
Infrasons, 217.
Intelligibilité, 225.
Intensité acoustique, 220.
Intensité lumineuse, 91.
Image-orthicon, 106.
Impédance d'antenne, 320.
— d'un H.P., 253.
— d'un lecteur, 297.
— d'un microphone, 225.
Ionisation, 69.
Ionophone, 254.
Ionosphère, 318.
Ions (piège à), 45.
Isolants, 160.
Isolateurs, 330.

J

Jumelage, 62.

K

Kénotron, 1.
Klystron, 60, 64.
— oscillateur, 66.
— réflex, 65.

L

Lampe phare, 59.
Larsen (effet), 237.
Laryngophone, 229, 237.
Laser, 122.
Lecteur, 296.
Lecteurs électrodynamiques, 297-300.
— électromagnétiques, 297-298.
— magnétiques, 310.
— piézo-électriques, 297, 301.
— stéréophonique, 303.
Lecture, 284.
Liant, 36.
Lignes, 353.
— bifilaires, 255.
— coaxiales, 256.
Loi de Child-Langmuir, 2.
— d'Einstein, 94.
— de Richardson, 2.
— de Paschen, 82.
Logatomes, 225.
Longue durée (tubes de), 22.
Lumen, 92.
Luminescence, 36.
Lux, 92.

M

Machines à bobiner, 199, 161.
Magnétophones, 312.
Magnétron, 60.
Marquage des redresseurs secs, 133.
Masse dynamique, 297.
Matériaux pour bobinages B.F., 157.
— pour bobinages H.F., 188.
— pour redresseurs, 126.
Microphones à bobine mobile, 243.
— à capsule, 231,
— à cellules, 236.
— à charbon, 229.
— à déphasage, 236.
— à grenaille, 230.
— à membrane, 236.
— à pression, 226.
— à ruban, 244.
— à vitesse, 226.
— cardioïde, 245.
— (classification des), 226.
— de proximité, 229.
— directifs, 226.
— (disposition des), 248.
— électrodynamiques, 242.
— électrostatiques, 239.
— labial, 229.
— (montage des), 284.
— multiples, 245.
— piezo-électriques, 232.
— (schémas des), 219.
— sonde, 229.
— (tableau comparatif des), 249.
Microscope électronique, 122.
Microsillons, 286.
Mixage, 284.
Mode π, 62.
Modulation de densité, 60.
— de vitesse, 60, 64.
— (électrode de), 35.
Moteur de tourne-disques, 306.
Mutateur, 89.

N

Nit, 92.
Normes des bobinages B.F., 185.
— des bobinages H.F., 216.
— des redresseurs, 154.
— des transistors, 154.
Noyaux des bobinages H.F., 193.
— des transformateurs F.I., 211.
— magnétiques, 156.
Nuvistors, 23.

O

Octode, 18.
Ondes électromagnétiques, 316.
— (propagation des), 317.
Ondulations des cônes, 264.
Ondes progressives, 68.
Optique électronique, 103.
Orthicon, 106.
Oscillation de relaxation, 79.
Oscilloscope, 37.
Oxyde cuivreux, 126.
Oxydes, 4.
Oxymétal, 126.

P

Padding, 206.
Paramètres de la triode, 9.
Pavillon, 252, 272.
Peltier (effet), 145.
Pelure (disque), 289.
Pente de conversion, 19, 125.
Pente d'une triode, 9, 12, 15.
Pentode, 15.
— à gain fixe, 16.
— à gain réglable, 17.
— de puissance, 18.
— pour large bande, 18.
Persistance, 42.
Perte de déviation angulaire, 219.
Pertes dans les antennes, 324.
Pertes dans les bobinages, 187.
— en H.F., 57.
Pervéance, 2.
Phanotron, 74.
Phosphorescence, 36.
Photicon, 105.
Photocathode, 96, 101, 103.
Photoconduction, 92.
Photodiodes, 115, 117.
Photoémission, 92, 100.
Photométrie, 99, 102.
Photomultiplicateurs, 101.
Photon, 92.
Photopiles, 111.
Phosphorescence, 36.
Pick-up, 296.
Piège à ions, 45.
Piézo-électricité, 232, 301.
Piste, 284.
Plage de régulation, 71.
Plaques de déviation, 39.
Plateau, 306.
Pleurage, 284.
Pointe de lecture, 285, 296, 304.
Poison, 36.

Polarisation d'antenne, 323.
— magnétique, 313.
— horizontale, 316.
Post-accélération, 40.
Potentiel d'excitation, 70.
— d'ionisation, 70.
Pots, 192, 196.
Poudres de fer, 191.
Pouvoir émissif, 3.
Préaccentuation, 283.
Précorrection, 283.
Profondeur de champ, 225.
Puissance modulée d'un H.P., 252.

Q

Quanta, 91.

R

Radars, 52.
Radiogène (tube), 118.
Radiographie, 120.
Rapport de transformation, 156, 162.
Rayon électronique, 36.
Récepteur électro-acoustique, 252.
Redressement, 4, 79.
Redresseurs à constact, 123.
— à cristal, 123.
— à vapeur de Hg., 86.
— secs, 125.
— (tableau comparatif des), 142.
Réenregistrement, 284.
Réflecteur, 60.
Régulation de I, 121.
Régulation de U, 82, 135.
Relais, 79.
Rendement d'une antenne, 322.
— d'un H.P., 253.
— d'un transducteur, 219.
— quantique, 91.
— lumineux, 42.
Résistance de rayonnement, 321.
— directe, 124.
— interne, 4, 9, 12, 15.
Résonateur, 60.
Rhumbatron, 60, 64.
Richardson-Dushmann (loi de), 2.
Robe, 34.
Ruban magique, 54.
Ruban magnétique, 290.

S

Saladier, 269.
Saturation, 3.
Schottky (effet), 4.
Scintillateur, 102.
Scintillement, 284.
Sécurité (tubes de), 21.
Sel de Seignette, 233.
Sélectivité spectrale, 92.
Sélectivité variable, 212.
Sélénium, 107, 112, 127.
Sensibilisateur, 36.
Sensibilité d'écrans, 41.
Sensibilité de déviation, 36.
— d'un indicateur, 53.
— d'un redresseur, 124.
— dynamique, 93, 95, 100.
— statique, 93, 94.
Seuil de fréquence, 92.
— de redressement, 128.
Sillon, 285.
Skiatron, 37.
Son, 220.
Sonde microphonique, 229, 237.
Soupape polyanodique, 86.
Souplesse latérale, 297.
— verticale, 297.
Spider, 267.
Spire, 155.
Spot, 35.
Stabilisateur de U, 81.
Stéradian, 92.
Stilb, 92.
Strapping, 62.
Subminiatures (tubes), 22.
Substances pour écrans, 42.
Super-iconoscope, 105.
Supports de bobinages, 189.
— d'électrodes, 41.
— magnétiques, 290.
— optiques, 294.
Surface projetée, 95.
Suspension de H. P., 266, 268.

T

Taux d'émission secondaire, 102.
Technetron, 147.
Télévision, 104.
Télévision (cinescopes pour), 44.
Télévision couleur, 52.
Temps de préchauffage, 74.
Tension critique de grille, 71.
Tension d'allumage, 71.
— d'anode, 95, 2.
— de blocage, 36.
— de chauffage, 74.
— de crête, 74.
— d'extinction, 71.
— directe (inverse), 123.
Tête de lecture, 296, 298, 303.
Tête magnétique, 310.
Tétrode, 11.
— à émission secondaire, 14.
— à faisceaux électroniques, 13.
Thermocouple, 121.
Thermoélectronique (émission), 1.
Thyrator, 148.
Thyratron, 75.
Thyratron à cathode froide, 84.
Thyratron tétrode, 77.
Timbre, 220.
Titane, 59.
Tôles pour circuit magnétique, 158.
Touret à main, 199.
Tourne-disques, 306.
Trace, 35.
Traînage, 92.
Transconductance, 9.
Transconducteur, 218.
Transformateur, 155.
— audio-fréquences, 171 à 181.
— d'alimentation, 162 à 171.
— de blocking, 180.
— de couplage, 178.
— de déphasage, 179.

Transformateur d'entrée, 177.
— de modulation, 179.
— de sortie, 178, 180.
— lignes, 215.
— moyenne fréquence, 208.
Transistor, 123.
Transistor à alliage, 145-149.
— à base diffusée, 146.
— à barrière de surface, 148.
— à couche intrinsèque, 148.
— à effet de champ, 147.
Transistor à tirage, 150.
— Drift, 148.
— Madt, 148.
— Mésa, 146.
— tétrode, 148.
— unijonction, 148.
Transitoires, 220.
Transit (temps de), 17, 57.
Transmodulation, 222, 17.
Trèfle cathodique, 54.
Trimmer, 206.
Triode à cristal, 123.
Triode à vide, 7, 11.
Triode crayon, 59.
Triode pour V.H.F., 57.
Trochotron, 57.
Trombone, 327.
Tube à basse pression, 80.
— à cathode chaude, 74.
— à cathode froide, 81.
— à cathode liquide, 86.
— à décharge, 83.
— à disques scellés, 59.
— à gaz, 69, 73.
— à haute pression, 81.
— à image, 103.
— à modulation de vitesse, 60.
— analyseur, 104, 110.
— à rayons X, 118.
— au néon, 85.
— à vide, 1.
— batterie, 22.
— bipolaires, 119.
Tubes cathodiques, 35.
— céramique-métal, 59.
— compteurs décimaux, 56.
— compteurs de radiations, 83.
Tubes d'émission, 24.
— de sécurité, 21.
— électromètres, 23.
— fer-hydrogène, 121.
— fluorescents, 79.
— hyperfréquences, 57.
— indicateurs, 53.
— longue durée, 22.
— luminescents, 83.
— micro-ondes, 57.
— multiples, 20.
— ondes progressives, 60, 67.
— ondes régressives, 69.
— photoémissifs, 93, 117.
— pour U de référence, 84.
— professionnels, 21.
— radiogènes, 118.
— régulateurs, 121.
— renforcés, 21.
— subminiatures, 22.
— unipolaires, 120.
Tungar (lampe), 75.
Tungstène, 4.
Tungstène thorié, 4.
Tweeter, 257.

U

Ultra-sons, 217.

V

Valves d'alimentation, 5.
Vapodyne, 30.
Vapotron, 30.
Varicaps, 144.
Vidicon, 110.
Volume acoustique, 218.

W

Wehnelt, 38.

Z

Zener (tension de), 144.
Zone atténuée, 68.
Zworikin, 104.

4330. Imprimerie Bayeusaine, 8, rue Royale, Bayeux. Dépôt légal : 4630 — 4e trim. 1964
Imprimé en France

BIBLIOTHÈQUE DE L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

SCHÉMAS D'ÉLECTRONIQUE

Préparation au Brevet de Technicien supérieur électronicien

PAR **J. MORNAND**

TOME I. — 215 pages 22 × 29. Broché ..... *à paraître en janvier 1965*

MESURES
SUR LES
AMPLIFICATEURS BASSE FRÉQUENCE

Classe de 1re des Lycées techniques, sections " radio-électricité "
Préparation aux C.A.P. et B.E.I.

PAR **J. SPELZ**

*VIII-98 pages 16 × 25, avec 87 figures. 1962. Broché ..... **6,30 F**
Cartonné ..... **7,80 F**

ÉLECTROTECHNIQUE APPLIQUÉE

Lycées techniques, sections " électricité ". Préparation au Brevet d'électrotechnicien

PAR

P. ROBERJOT **J. LOUBIGNAC**

*TOME I. — *Essais des machines électriques.* 424 pages 16 × 25, avec 456 figures. 2e *édition.* 1963. Broché ..... **18,20 F**
Cartonné ..... **19,70 F**
*TOME II. — *Mesures électriques en courant continu et en régimes transitoires.* XVI-250 pages 16 × 25, avec 267 figures. 2e *édition.* 1964. Broché. **11,20 F**
Cartonné ..... **12,80 F**
TOME III. — *Mesures électriques en courant alternatif* ..... *en préparation*

BIBLIOTHÈQUE PROFESSIONNELLE

ÉLECTRONIQUE
ET
RADIOÉLECTRICITÉ

PAR **G. THALMANN**

TOME I. — *Basse fréquence.* 416 pages 14 × 22, avec 452 figures. 3e *édition.* 1963. Broché sous jaquette ..... **43 F**
TOME II. — *Haute fréquence.* 340 pages 14 × 22, avec 258 figures. 2e *édition.* 1964. Broché ..... **41 F**
TOME III. — *Transistors. Modulation de fréquence. Instruments de mesure.* 328 pages 14 × 22, avec 196 figures et index alphabétique. 1961. Broché sous jaquette ..... **37 F**

**Ouvrages inscrits sur la liste des manuels adoptés par les écoles de la Ville de Paris*

DUNOD ÉDITEUR, 92, RUE BONAPARTE, PARIS-6e - DAN. 99-15